



## Beregning af relevante individ- og befolkningsdoser på dansk territorium fra hypotetiske kernenedsmeltningsuheld på Barsebäck reaktoren

Forsøgsanlæg Risø, Roskilde

*Publication date:*  
1977

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Forsøgsanlæg Risø, R. (1977). *Beregning af relevante individ- og befolkningsdoser på dansk territorium fra hypotetiske kernenedsmeltningsuheld på Barsebäck reaktoren*. Risø National Laboratory. Risø-M No. 1905

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Title and author(s)	Date January 1977
BEREGNING AF RELEVANTE INDIVID- OG BEFOLKNINGS- DOSER PÅ DANSK TERRITORIUM FRA HYPOTETISKE KERNENEDSMELTNINGSUHELD PÅ BARSEBÄCK REAKTOREN	Department or group
	Group's own registration number(s)
pages + tables + illustrations	
<p><b>Abstract</b></p> <p>Individual and population doses within Danish territory are calculated from hypothetical, severe core-melt accidents at the Swedish nuclear plant at Barsebäck. The fission product inventory of the Barsebäck reactor is calculated. The release fractions for the accidents are taken from WASH-1400.</p> <p>Based on parametric studies, doses are calculated for very unfavourable, but not incredible weather conditions. The probability of such conditions in combination with wind direction towards Danish territory is estimated.</p> <p>Doses to bone marrow, lungs, GI-tract and thyroid are calculated based on dose models developed at Risø. These doses are found to be consistent with doses calculated with the models used in WASH-1400.</p> <p>Available on request from the Risø Library, Research Establishment RISØ (Risø Bibliotek, Forsøgsanlæg RISØ), DK-4000 Roskilde, Denmark. Telephone: (03) 35 51 01, ext. 334, telex: 43116.</p>	Copies to

ISBN 87-550-0439-3

## FORORD

I marts 1976 modtog Forsøgsanlæg Risø fra Tilsynet med Nukleare Anlæg en anmodning gående ud på, "at der med anvendelse af bedst muligt dokumenterede data ønskes udført undersøgelser til belysning af konsekvenser for dansk område af frigørelser af radionukleare stoffer fra Barsebäck-værket i tilfælde af reaktoruheld med kernenedsmeltning. Konsekvenserne ønskes undersøgt for forskellige vejrforhold".

Under de nærmere drøftelser af undersøgelsens karakter og omfang har Tilsynet med Nukleare Anlæg lagt vægt på, at der blev tale om en dansk vurdering. Hovedberegningerne i nærværende rapport er derfor gennemført med de beregningsmodeller, der er udviklet på Risø. Rapporten omfatter derfor også en nærmere omtale af disse modeller og en diskussion af forskellen mellem disse og tilsvarende amerikanske modeller.

En dansk vurdering af de sundhedsmæssige konsekvenser af de beregnede doser må påhvile Sundhedsstyrelsen. Der er derfor i denne rapport kun foretaget en meget grov vurdering ud fra tilgængelige amerikanske oplysninger.

En foreløbig udgave af denne rapport har været forelagt Meteorologisk Institut, som har ydet en væsentlig bistand ved gennem diskussioner og skriftlige kommentarer at fremsætte konstruktiv kritik, og som har udført de meteorologiske beregninger for stationerne Kastrup, Gladsaxe og Værløse. Risø har dog alene ansvaret for den endelige formulering af rapporten.



INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1. INDLEDNING .....	5
2. AKTIVITETSUDSLIP VED KERNENEDSMELTNINGSUHELD .....	6
2.1. Uheldskategorier .....	6
2.2. Specielle forhold ved Barsebäck reaktoren .....	10
3. DOSER FRA ATMOSFÆRISK SPREDT RADIOAKTIVITET .....	12
3.1. Spredning af radioaktivitet i atmosfæren .....	12
3.2. Indåndingsdosis .....	12
3.3. Ekstern gammadosis fra fanen .....	13
3.4. Ekstern gammadosis fra aktivitet på jordover- fladen .....	14
3.5. Eksterne betadoser .....	15
3.6. Organdoser .....	15
4. METEOROLOGI .....	17
4.1. Valg af meteorologiske situationer .....	17
4.2. Spredningsforholdene i området Barsebäck- København .....	17
4.3. Meteorologisk statistik .....	19
4.4. Midlingstidens indflydelse på tids-middel- koncentrationen .....	23
4.5. Fanens højde over jorden .....	24
5. PARAMETERSTUDIER MED WASH-1400 MODELLEN .....	25
5.1. Atmosfærens stabilitet .....	26
5.2. Stabilitetskategori F uden nedbør .....	27
5.2.1. Uheldskategorien .....	27
5.2.2. Vindhastigheden .....	27
5.2.3. Udskillelæshastigheden .....	28
5.3. Stabilitetskategori D med regn .....	30
5.3.1. Uheldskategorien .....	30
5.3.2. Vindhastigheden .....	31
5.3.3. Udvaskningskoefficienten .....	32

	Side
6. DOSISBEREGNINGER MED RISØ MODELLEN .....	33
6.1. BWR2 - Pasquill F .....	34
6.2. BWR1 - Pasquill D, regn .....	38
6.3. BWR3 - Pasquill D .....	48
7. SAMMENLIGNING AF RESULTATER FRA RISØ- OG WASH-1400 MODELLEN .....	49
8. SAMMENFATNING OG KONKLUSION .....	52
8.1. Dosisberegninger .....	52
8.2. Vurdering af de beregnede dosers betydning .....	52
8.3. Diskussion af dosisberegningerne .....	57
9. REFERENCER .....	59

#### APPENDICES

1. Model til beregning af doser fra radioaktivt materiale frigjort til atmosfæren (WASH-1400 model).
2. Model til beregning af doser fra radioaktivt materiale frigjort til atmosfæren (Risø model).
3. Meteorologi.
4. Fissionsproduktindhold i Barsebäckreaktoren.

## 1. INDLEDNING.

En væsentlig bestanddel i en risikovurdering af et A-kraftværk er vurderingen af strålingsdoser fra hypotetiske reaktoruheld, hvor radioaktivitet frigøres til omgivelserne. Til dette formål har beregningsmodeller og tilhørende datamaskineprogrammer gennem flere år været under udvikling på Risø.

Den foreliggende rapport vurderer strålingsdoser på dansk territorium fra hypotetiske kernenedsmeltningsuheld på Barsebäck reaktoren. Vurderingen er baseret på dosisberegninger udført ved hjælp af datamaskineprogrammer udarbejdet på grundlag af Risø's beregningsmodel [1]. Til sammenligning er der udført dosisberegninger ved hjælp af et datamaskineprogram (RASDOS 1) udarbejdet på grundlag af beregningsmodellen i WASH-1400 (Rasmussen-rapporten) [2, 3]. WASH-1400 modellen og Risø's model er beskrevet i henholdsvis appendiks 1 og 2.

For at give et indtryk af de anvendte metoders følsomhed over for de indgående parametre er der foretaget variationer af nogle af de væsentlige af disse. Rapporten indeholder endvidere en bedømmelse af sandsynlighederne for de betragtede meteorologiske situationer.



## 2. AKTIVITETSUDSLIP VED KERNENEDSMELTNINGSUHELD.

### 2.1. Uheldskategorier.

I WASH-1400 er de betragtede uheld inddelt i kategorier. Hver kategori er repræsentativ for flere forskellige uheldsssekvenser, og for hver kategori er der angivet en samlet uheldssandsynlighed samt frigørelsesprocenter for de enkelte isotoper. For kogendevandsreaktorers vedkommende er disse tal baseret på en detaljeret analyse af et stort antal tænkte uheldsssekvenser på en eksisterende reaktor i USA, nemlig Peach Bottom reaktoren.

Af WASH-1400's uheldskategorier for kogendevandsreaktorer er det kun de tre første kategorier (BWR1, BWR2 og BWR3), som indeholder både en kernenedsmeltning og et brud på reaktorindeslutningen. Da det kun er sådanne uheldskategorier, som kan tænkes at forårsage signifikante indviddoser på dansk område, danner de grundlaget for beregningerne i denne rapport.

En kortfattet beskrivelse af de fysiske processer, som definerer de tre uheldskategorier, er i reference 3 formuleret således:

#### BWR1

This release category is representative of a core meltdown followed by a steam explosion in the reactor vessel. The latter would cause the release of a substantial quantity of radioactive material to the atmosphere. The total release would contain approximately 40% of the iodines and alkali metals present in the core at the time of containment failure. Most of the release would occur over a 1/2 hour period. Because of the energy generated in the steam explosion, this category would be characterized by a relatively high rate of energy release to the atmosphere. This category also includes certain sequences that involve overpressure failure of the containment prior to the occurrence of core melting and a steam explosion. In these sequences, the rate of energy release would be somewhat smaller than for those discussed above, although it would still be relatively high.

**BWR2**

This release category is representative of a core meltdown resulting from a transient event in which decay-heat-removal systems are assumed to fail. Containment overpressure failure would result, and core melting would follow. Most of the release would occur over a period of about 3 hours. The containment failure would be such that radioactivity would be released directly to the atmosphere without significant retention of fission products. This category involves a relatively high rate of energy release due to the sweeping action of the gases generated by the molten mass. Approximately 90% of the iodines and 50% of the alkali metals present in the core would be released to the atmosphere.

**BWR3**

This release category represents a core meltdown caused by a transient event accompanied by a failure to scram or failure to remove decay heat. Containment failure would occur either before core melt or as a result of gases generated during the interaction of the molten fuel with concrete after reactor-vessel meltthrough. Some fission-product retention would occur either in the suppression pool or the reactor building prior to release to the atmosphere. Most of the release would occur over a period of about 3 hours and would involve 10% of the iodines and 10% of the alkali metals. For those sequences in which the containment would fail due to overpressure after core melt, the rate of energy release to the atmosphere would be relatively high. For those sequences in which overpressure failure would occur before core melt, the energy release rate would be somewhat smaller, although still moderately high.

Tabel 1. Frigørelsesprocenter ved kernens smeltningstid

Isotop	Frigørelsesprocent		
	Tab 1 $T_m = 2h$	Tab 2 $T_m = 10h$	Tab 3 $T_m = 100h$
Ce 58	50	1	2
Ce 60	50	1	2
Pr 85	100	100	100
Pr 85m	100	100	100
Pr 87	100	100	100
Pr 88	100	100	100
Pr 86	40	10	10
Sr 90	5	10	1
Sr 90	5	10	1
Sr 91	5	10	1
Y 90	0,5	0,4	0,4
Y 91	0,5	0,4	0,4
Zr 95	0,5	0,4	0,4
Zr 97	0,5	0,4	0,4
Mo 95	0,5	0,4	0,4
Mo 96	0,5	0,4	0,4
TC 99m	50	1	2
Ru 103	50	1	2
Ru 105	50	1	2
Ru 106	50	1	2
Rh 105	50	1	2
Te 127	70	10	10
Te 127m	70	10	10
Te 129	70	10	10
Te 129m	70	10	10
Te 131m	70	10	10
Te 132	70	10	10
Sb 127	70	10	10
Sb 129	70	10	10
I 131	40	90	10
I 132	40	90	10
I 133	40	90	10
I 134	40	90	10
I 135	40	90	10
Xe 133	100	100	100
Xe 135	100	100	100
Cs 134	40	50	10
Cs 136	40	50	10
Cs 137	40	50	10
Ra 140	5	10	1
La 140	0,5	0,4	0,4
Ce 141	0,5	0,4	0,4
Ce 143	0,5	0,4	0,4
Ce 144	0,5	0,4	0,4
Pr 143	0,5	0,4	0,4
Nd 147	0,5	0,4	0,4
Np 239	0,5	0,4	0,4
Pu 238	0,5	0,4	0,4
Pu 239	0,5	0,4	0,4
Pu 240	0,5	0,4	0,4
Pu 241	0,5	0,4	0,4
Am 241	0,5	0,4	0,4
Cm 242	0,5	0,4	0,4
Cm 244	0,5	0,4	0,4

I tabel 1 er vist frigørelsesprocenterne for de tre omtalte uheldskategorier samt den køletid  $T_k$  (tidsintervallet fra reaktorens nedlukning til frigørelsens begyndelse), som procenterne refererer til.

Beregningen af udslipsprocenterne i WASH-1400 tager ikke hensyn til kondensation og sammensmeltning af dråber i containment-bygningen. En sammenligning med beregninger udført med det tyske datamaskineprogram NAUA [11] synes at vise, at WASH-1400 giver en betydelig overvurdering af udslip til atmosfæren.

Som udgangspunkt for de anvendte radioaktivitetsfrigørelser er fissionsproduktindholdet i Barsebäck reaktoren beregnet med datamaskineprogrammerne FIPO [4] og BEGAFIP [5]. Indholdet er beregnet ud fra en udbrænding (energifrigørelse) på 18 MWd/kg uran. I appendiks 4 er vist inventaret af de isotoper, hvoraf en procentdel tænkes frigjort ved et kernenedsmeltningssuheld. Isotoperne er de samme som betragtes i WASH-1400. Inventaret er i appendiks 4 beregnet til forskellige tidspunkter, nemlig umiddelbart efter nedlukning af reaktoren, efter 2 timers og efter 30 timers køletid. Køletiderne er dem, som anvendes i WASH-1400, nemlig 2 timer for BWR1- og 30 timer for BWR2- og BWR3-frigørelserne.

Isotopfrigørelserne for de betragtede uheldskategorier fås som produktet af inventaret vist i appendiks 4 og frigørelsesprocenterne i tabel 1. For BWR1-, BWR2- og BWR3-uheldskategorierne bliver den samlede aktivitetsfrigørelse henholdsvis 529 MCi, 264 MCi og 143 MCi.

Varmemængderne i udslippene er ifølge WASH-1400 henholdsvis 68 400 MWs, 97 200 MWs og 64 800 MWs. Heri er ikke medregnet den medfølgende damps frigørelse af varme ved kondensation. Frigørelsestiderne er henholdsvis 0.5 timer for BWR1 og 3 timer for BWR2 og BWR3, jvf. uheldsbeskrivelserne.

## 2.2 Specielle forhold ved Barsebäck reaktoren.

Beregningerne i WASH-1400 er som nævnt for kogendevandsreaktorers vedkommende baseret på analyser af Peach Bottom reaktoren i USA. Barsebäck reaktoren er en kogendevandsreaktor, men er ikke identisk med Peach Bottom reaktoren, og sammenhængene mellem uheldssandsynligheder og frigørelsesprocenter kan derfor være forskellige for de to reaktorer.

Da de absolutte uheldssandsynligheder er af begrænset interesse for rapportens formål, har det ikke været fundet hensigtsmæssigt at gennemføre en detaljeret analyse af dette forhold.

Ved en indtruffen kernenedsmeltning er de absolutte frigørelsesprocenter derimod væsentlige for beregningen af strålingsdosernes størrelse, og det må derfor overvejes, om konstruktive forskelle mellem Peach Bottom reaktoren og Barsebäck reaktoren vil give anledning til en ændret vurdering af udslipsprocenterne.

De to reaktorer har i det væsentlige samme principielle opbygning, og der er ikke i udformningen af reaktortanken eller opbygningen af reaktorkernen forskelle, der synes afgørende at ville påvirke forløbet af et kernenedsmeltningsuheld. Forskelle i udformningen af de forskellige sikkerhedssystemer er af mindre betydning for forløbet af sådanne uheld, der jo netop forudsætter, at disse systemer svigter helt eller delvis.

Begge reaktorer er forsynet med pressure suppression containment. Forskelle mellem de to containments relative størrelse og dimensioneringsgrundlag er små og formodentlig uden betydning for uheldsforløb af den betragtede type. Derimod er der to relevante konstruktive forskelle.

A. Barsebäck har wetwell placeret lige under drywell, så en smeltet kerne - i modsætning til i Peach Bottom - fra drywell-gulvet kan fortsætte ned i wetwell bassinet. Dette vil på den ene side medføre en vis risiko for dampekspllosion i wetwell bassinet, men på den anden side betyde, at en del af fissionsprodukterne tilbageholdes i wetwell-vandet.

I modsætning til, hvad der ifølge WASH-1400 er tilfældet for Peach Bottom, er der i Barsebäck - på grund af at den smeltede kerne evt. kan blive kølet i wetwell bassinet - en mulighed for, at der ikke sker brud på containment.

B. Barsebäcks containment er opført i beton med tilslag af granit, mens Peach Bottom har tilslag af kalksten. I Barsebäck findes der således ikke mulighed for nogen nævneværdig udvikling af kuldioxid ved den smeltede kernes berøring med gulve eller vægge. Herved nedsættes dels den aktivitetsfrigørelse, der forårsages af, at kuldioxid bobler op gennem smelten, og dels sandsynligheden for brud på containment som følge af trykopbygning.

De anførte sammenligninger mellem Peach Bottom og Barsebäck viser, at det er rimeligt at antage, at kernenedsmeltningssuheld i Barsebäck vil give mindre relative aktivitetsudslip til atmosfæren end de tilsvarende uheld i Peach Bottom. I denne rapport anvendes dog de i WASH-1400 angivne udslipsprocenter for Peach Bottom-reaktoren som formentligt konservative skøn for Barsebäck.

### 3. DOSER FRA ATMOSFÆRISK SPREDT RADIOAKTIVITET.

#### 3.1. Spredning af radioaktivitet i atmosfæren.

Ved en kontinuerlig frigørelse af luftbårne radioaktive stoffer vil aktiviteten udbrede sig som en fane i vindretningen. Koncentrationen ved jordoverfladen i en given afstand fra frigørelsespunktet vil afhænge af vindhastigheden, atmosfærens stabilitet, nedbørsforholdene, frigørelseshøjden, terrainform, aktivitetens fysisk-kemiske form, udslippets varmeindhold, tilstedeværelse af blandingslag etc.

Den grundlæggende spredningsmodel i både Risø og WASH-1400 modellerne er den såkaldte gaussisk spredningsmodel. Den forudsætter, at materialet er normalt (gaussisk) fordelt omkring fanens centerlinie både vertikalt og horizontalt i planet vinkelret på vindretningen [ 6 ]. I WASH-1400 anvendes en modificeret udgave af den gaussiske model [ 3 ], hvori den horizontale normalfordeling er erstattet af en rektangulær fordeling.

Der tages i begge modeller hensyn til, at efterhånden som radioaktiviteten transporteres med vinden, vil en del af aktiviteten fjernes fra fanen, dels ved radioaktivt henfald, dels ved udskillelse (tørdeponering) eller udvaskning under nedbør (våd-deponering). Endvidere tages hensyn til, at fanens varmeindhold får denne til at stige til vejrs.

Den frigjorte radioaktivitet vil give anledning til tre former for strålingsdoser, eksterne (ydre) doser henholdsvis fra radioaktivitet i fanen og fra radioaktivitet, som er deponeret på jordoverfladen, samt interne (indre) doser fra indåndet radioaktivitet. De mulige akutte skadevirkninger kan forekomme som følge af relativt store doser til knoglemarv, lunger, mave-tarmkanal og skjoldbruskkirtel.

#### 3.2. Indåndingsdosis.

Hvis fanen befinder sig i en vis højde over jordoverfladen vil koncentrationen af radioaktivt materiale ved jordoverfladen på kortere afstande være meget lille og betydningsløs. Først på større afstande vil fanens udbredelse i vertikal retning give anledning til væsentlige koncentrationer ved jordoverfladen. En

person, der opholder sig her, vil indånde en aktivitetsmængde, der er proportional med fanens passagetid og koncentrationen på det pågældende sted.

Den indåndede aktivitet vil herefter fordele sig i kroppens organer afhængig af stoffets art og dets kemiske form, og siden dels henfalde til stabile isotoper og dels udskilles biologisk. Indåndingsdosen absorberes derfor over et tidsrum, som afhængig af isotopsammensætningen kan variere fra få uger til flere år.

Ved ophold indendørs må der forventes en vis formindskelse af indåndingsdosen og en forsinkelse i optagelsen. Bedømmelsen af forholdene er imidlertid temmelig kompliceret og usikker, hvorfor der ikke er foretaget nogen reduktion af indåndingsdosen som følge af indendørs ophold.

For de betragtede uheld udgør indåndingsdosen det største bidrag til den totale dosis til lunger, mave-tarmkanal og skjoldbruskkirtel.

### 3.3. Ekstern gammadosis fra fanen.

Den eksterne gammadosis fra fanen er proportional med fanens passagetid, men i modsætning til indåndingsdosen også afhængig af koncentrationsfordelingen af aktiviteten i omegnen af det betragtede opholdssted, idet gammastråling har en betydelig rækkevidde i luft.

I modsætning til den interne strålingspåvirkning fra indåndet aktivitet vil den eksterne strålingspåvirkning ophøre, når fanen er passeret.

Ved ophold indendørs vil den eksterne gammadosis fra fanen være reduceret betydeligt på grund af bygningens afskærmende virkning. Ved beregninger af hovedparten af doserne i denne rapport er der anvendt en reduktionsfaktor for ekstern gammastråling fra fanen på 0.6. Denne værdi er angivet i WASH-1400 som repræsentativ for énfamiliehuse og etagebyggeri af mursten [3]. I WASH-1400 er det oplyst, at amerikanerne i gennemsnit opholder sig ca. 11% af tiden udendørs. Tages der hensyn til dette og endvidere til forskellige bygningstyper fås for amerikanske forhold en gennemsnitlig afskærmningsfaktor for ekstern gammastråling fra fanen på 0.75. En eventuel forskydning af gennemsnitsfaktorer til den ene eller den anden side på grund af en anden bygningstypesammen-



sætning og et andet indendørs/udendørs forhold for danske forhold vil under alle omstændigheder ligge inden for den usikkerhed på en faktor 2-3, som man må regne med, der er på dosisberegningerne.

#### 3.4. Ekstern gammadosis fra aktivitet på jordoverfladen.

Under fanens udbredelse vil en del af indholdet udskilles og deponeres på jordoverfladen. Forekommer der nedbør, vil desuden en del af aktiviteten udvaskes og afsættes på jordoverfladen. Gammastrålingen fra aktiviteten på jordoverfladen vil give anledning til en strålingsdosis i den tid, en person opholder sig på det forurenede område. Dosishastigheden på det betragtede sted er afhængig af størrelsen af overfladeaktiviteten dels på selve stedet dels i den nærmeste omegn på grund af gammastrålingens betydelige rækkevidde.

Efterhånden som aktiviteten på jordoverfladen henfalder til stabile isotoper eller fjernes ved andre mekanismer, f.eks. bortskylning og nedsivning med regnvand, vil dosishastigheden aftage. Den eksterne stråling fra jordoverfladeaktiviteten vil i modsætning til den eksterne stråling fra fanen give anledning til strålingsdoser også efter fanens passage. Overfladeforureningen vil desuden kunne give anledning til interne doser via fødekæder.

Den eksterne gammadosis fra den deponerede radioaktivitet er for de betragtede uheld den dominerende del af den totale helkrops- og knoglemarvsdosis.

Ved ophold indendørs vil den eksterne gammadosis fra aktiviteten på jordoverfladen være reduceret betydeligt. Med samme kilde og ud fra samme betragtninger som omtalt under 3.3. er der ved beregning af hovedparten af doserne i denne rapport anvendt en reduktionsfaktor for ekstern gammastråling fra den deponerede aktivitet på 0.2 og en gennemsnitlig afskærmningsfaktor på 0.33. I sidstnævnte faktor indgår en reduktionsfaktor på 0.7 for dosen fra deponeret aktivitet på grund af jordoverfladens ruhed [3]. Denne faktor er ikke inkluderet i faktoren 0.2 men anvendt eksplícit i alle de beregninger i denne rapport, som ikke beskriver gennemsnitssituationer.

### 3.5. Eksterne betadoser.

Aktiviteten i fanen og den deponerede aktivitet på jordoverfladen vil ikke alene udsende gammastråling, men også betastråling. Denne stråling er dog langt mindre gennemtrængende end gammastrålingen og kan derfor kun give anledning til huddoser på den del af kroppen, som er ubeskyttet af klæder. Den mest energirige del af betapartiklerne kunne tænkes at bidrage til den genetiske dosis, men beregningerne viser, at den genetiske dosis fra betastrålingen er uden betydning.

### 3.6. Organdoser.

Organdoserne er beregnet som "akutte" indviddoser. Ved "akut" dosis forstås her den dosis, som, hvis den blev modtaget indenfor få timer, ville have samme virkning med hensyn til akutte skader som den faktiske - evt. over et længere tidsrum - modtagne dosis.

Den akutte knoglemarvsdosis er beregnet som summen af den eksterne gammadosis fra fanens passage, den eksterne gammadosis over 24 timer fra aktivitet på jordoverfladen, hele indåndingsdosen i de første 7 dage samt halvdelen af indåndingsdosen fra den 8. til den 30. dag. Begrundelsen for reduktionen af indåndingsdosen fra den 8. til den 30. dag er, at en strålingsdosis, som modtages over et tidsrum af 2-4 uger, kun er ca. halvt så effektiv med hensyn til skadevirkning, som hvis den samme dosis modtages over få dage [3]. Hovedparten af indåndingsdosen til knoglemarven modtages inden for de første 30 dage.

Den akutte lungedosis er beregnet som summen af de eksterne gammadoser til lungerne og indåndingsdosen efter 365 dage. For de betragtede uheldsudslip vil ca. 80% af indåndingsdosen være absorberet inden for et år, og da risikoen for akutte skader er afhængig af hastigheden, hvormed lungedosen akkumuleres, vil denne beregningsmetode give et konservativt resultat.

Mave-tarmkanalens indhold udskiftes normalt relativt hurtigt, og indåndingsdosen til dette organ vil stort set være absorberet efter en uges tid. Den akutte dosis til mave-tarmkanalen er derfor beregnet som summen af de eksterne gammadoser til mave-tarmkanalen og indåndingsdosen efter 7 dage.

Indåndingsdosen til skjoldbruskkirtlen vil for de betragtede uheldsudslip hovedsagelig stamme fra jodisotoperne i udslippet,

og af disse vil isotopen I 131 bidrage med ca. to trediedel af dosen. Da I 131 har en halveringstid på 8 dage og de øvrige jod-isotoper har halveringstider på under 1 dag, vil størstedelen af indåndingsdosen være absorberet efter ca. 1 måned. Den akutte dosis til skjoldbruskkirtlen er derfor beregnet som summen af de eksterne gammadoser til skjoldbruskkirtlen og indåndingsdosen efter 30 dage. Indåndingsdosen er beregnet for voksne; dosen til børn kan afhængig af alderen være op til 3 gange så stor som dosen til voksne.

Ved beregning af senskader skal yderligere medtages den dosis, der absorberes over de følgende år fra alle eksponeringsveje, f.eks. indtag af aktivitet via fødekæder.

#### 4. METEOROLOGI.

##### 4.1. Valg af meteorologiske situationer.

I de undersøgelser, der ligger til grund for WASH-1400 har man, ved at beregne doser for en lang serie af observerede vejr-situationer, fundet en række akkumulerede sandsynlighedsfunktioner for doser i en given afstand og retning. Beregninger af denne art kræver imidlertid ressourcer og tid, der ligger langt ud over, hvad der har været til rådighed for det foreliggende arbejde. Det har derfor været nødvendigt i stedet at gennemføre beregningerne for en række vejr-situationer, som man på forhold ved giver store doser, og som optræder med en ikke forsvindende sandsynlighed.

I den gaussiske spredningsmodel indgår meteorologien gennem såvel vindhastigheden som spredningsparametrene. Sidstnævnte angiver, hvorledes bredden og højden af fanen i en given afstand fra kilden afhænger af den rådende vejr-situation.

Vejret karakteriseres ved syv vejrtyper, de såkaldte Pasquill stabilitetskategorier A-G, hvor A er ustabil med stærk turbulent spredning, og G er stabil med svag turbulent spredning.

En vurdering af beregningerne viser, at langt den største part af sandsynligheden for at få relativt store doser hidrører fra vejr-situationer med neutral stabilitet (Pasquill D) og regn. En mindre del af sandsynligheden hidrører fra stabile vejr-situationer (Pasquill F) med lave vindhastigheder.

Principielt giver metoden en undervurdering af sandsynligheden, idet man kan have udelukket nogle tilfælde, der bidrager til denne.

##### 4.2. Spredningsforholdene i området Barsebäck-København.

De formelsæt, som WASH-1400 og Risømodellen anvender til at beskrive spredningsparametrenes afhængighed af vejrtype og afstand fra kilden, er bestemt ved spredningsforsøg over land. Tilsvarende formelsæt for spredning over vand findes ikke, idet kun meget få diffusionsforsøg er udført over vand. Det er almindeligt antaget, at spredning over vand er mindre end over land på grund af, at den aerodynamiske overfladeruhed er meget mindre over vand.

En vurdering af de spredningsmæssige forhold i området mellem Barsebäck og København ville ideelt kræve mange års meteorologiske målinger foretaget i dette område langs 200-300 meter høje master suppleret med en lang række spredningsforsøg.

Da ingen af dele findes, er man henvist til at foretage spredningsvurderingen ud fra viden om spredning over vand indhentet andetsteds samt ud fra meteorologiske måleserier hovedsageligt fra Risø og fra Kastrup.

Risø-dataene er målt hver time langs en 123 meter høj mast og omfatter vindretning, vindhastighed og temperatur. Fra Kastrup foreligger der en synoptisk observation hver time, herunder vindretning og -hastighed i 10 meters højde.

I en undersøgelse ved hjælp af satellitbilleder af røgfaner fra høje skorstene placeret langs de store søer i U.S.A. [10] siges det blandt andet om et tilfælde, hvor varm luft strømmer ud over en kold vandoverflade: "estimates made by measuring the widths of the visible plume as a function of distance from their sources suggested that while they originally were spreading at Pasquill-Gifford class A <sup>\*)</sup>, after about 30-40 km of over water fetch, they were showing Pasquill-Gifford class F or even G characteristics. This suggests that while the plume originally undergoes rapid mixing due to its own internal turbulence (active diffusion) as well as the turbulence present in the air as it crosses the shoreline (passive diffusion), both processes decay rapidly with overwater fetch, the flow becoming almost "laminar" some tens of kilometers upwind".

De vejrforhold, der er af interesse for spredningsforholdene mellem Barsebäck og København er sådanne, hvor vinden er østlig. Vinden vil således have blæst over land ca. 100 km, før den når Barsebäck, og dermed vil den atmosfæriske turbulente opblanding (passive diffusion) af en fane udgående fra Barsebäck i 100 m's højde hovedsagelig være bestemt af de termiske og topografiske forhold over land. I 20 km afstand fra Barsebäck vil forholdene over vand muligvis også have ydet indflydelse på spredningen.

---

\*)

The Pasquill-Gifford classes svarer til, hvad der i nærværende rapport betegnes Pasquill kategorier.

Det må dog antages, at fejlen ved at negligere denne indflydelse ligger vel inden for den usikkerhed på en faktor 2 til 3, som man i alle tilfælde regner med, der er på spredningsberegninger.

Østenvinden vil, når den passerer Risø, have bevæget sig over land ca. 30 km, og man kan derfor forvente, at under forhold med østenvind vil de på Risø målte atmosfæriske parametre almindeligvis være repræsentative også for området ved Barsebäck.

Dette i forbindelse med det faktum, at Risø-dataene indeholder information om de meteorologiske forhold helt op til 123 m's højde, gør, at disse data er det mest velegnede datasæt til bestemmelse af hyppigheden for de vejr-situationer, som er valgt ved dosisberegningerne.

Man skal her bemærke sig, at hvad angår spredningsforholdene i 100 m's højde, kan beregninger foretaget ved hjælp af Kastrup-dataene være behæftet med betydelige systematiske fejl på grund af vindhastighedens og vindretningens variation med højden.

I det efterfølgende afsnit vises hyppigheder for forskellige vejr-situationer beregnet ud fra Risø-dataene og disse sammenlignes med de tilsvarende hyppigheder for Kastrup-dataene. Herudover vil der også blive sammenlignet med målinger foretaget i TV-masten i Gladsaxe og målinger fra en synoptisk station i Værløse.

Formålet med sammenligningen er at give konservative skøn for hyppighederne af de valgte vejr-situationer og at bestemme usikkerhederne på disse. Ud fra tabellerne givet her og i appendiks 3 kan der foretages en sådan vurdering.

#### 4.3. Meteorologisk statistik.

Tabel 2 viser fordelingen af vindretningen ved de tre stationer Risø, Kastrup og Gladsaxe for alle stabilitetskategorier. Tabellen viser god overensstemmelse stationerne imellem.

Tabel 2

Fordeling af vindretning i procent af tiden på 30° sektorer  
for RISØ, KASTRUP og GLADSAXE

STATION	VINDRETNINGSEKTOR											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
RISØ	6.2	5.1	4.1	7.4	9.4	9.1	7.4	10.8	14.0	12.9	7.7	6.0
KASTRUP	6.8	4.3	7.3	7.8	7.8	7.4	7.8	9.2	14.7	14.8	8.8	3.3
GLADSAXE	5.4	5.4	4.4	9.0	7.6	5.8	6.9	8.5	11.0	14.4	14.3	7.3

Måleperiode og målehighde er henholdsvis RISØ 1958-1967, 123 m; KASTRUP 1959-1967, 10 m; GLADSAXE 1/3 1974-29/2 1976, 200 m. Vindretningssektorerne er angivet ved sektormidten.

Tabel 3 viser tilsvarende fordelingen for kategori F+G. Det ses at hyppigheden af vinde i den østlige sektor (60, 90 og 120) er henholdsvis 2.0, 1.6 og 0.7%. Tallene illustrerer det velkendte fænomen, at stabile situationer forekommer relativt sjældent over storbyer på grund af byens varmeafgivelse til atmosfæren.

Tabel 3

Fordeling af vindretning i procent af tiden på 30° sektorer for RISØ, KASTRUP og GLADSAXE  
Stabilitet F og G

STATION	VINDRETNINGSEKTOR											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
RISØ	0.29	0.35	0.38	0.73	0.93	0.98	0.76	0.65	0.57	0.43	0.20	0.26
KASTRUP	0.71	0.46	0.68	0.46	0.43	0.47	0.75	0.98	1.80	2.58	1.42	0.52
GLADSAXE	0.25	0.38	0.18	0.19	0.33	0.24	0.21	0.14	0.15	0.27	0.17	0.37

Måleperiode og målehighde er henholdsvis RISØ 1958-1967, 123 m; KASTRUP 1959-1967, 10 m; GLADSAXE 1/3 1974-29/2 1976, 200 m. Vindretningssektorerne er angivet ved sektormidten.

I tabel 4, der viser fordelingen for kategori D, er hyppighederne i den østlige sektor henholdsvis 12.1, 18.0 og 12.7% og for samtlige vindretninger 60.3, 72.7 og 58.6%. Risø og Gladsaxe viser god overensstemmelse. Kastrup viser større hyppigheder for stabilitetskategori D, hvilket hovedsageligt skyldes forskelle i metoderne til bestemmelse af stabilitetsklasser. Dette diskuteres i appendix 3.

Tabel 4

Fordeling af vindretning i procent af tiden på 30° sektorer for RISØ, KASTRUP og GLADSAXE  
Stabilitet D

STATION	VINDRETNINGSSEKTOR											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
RISØ	3.92	3.32	2.37	4.10	5.67	4.89	4.00	6.38	9.11	8.50	4.47	3.54
KASTRUP	4.65	2.86	5.45	6.34	6.18	5.50	5.79	6.70	10.89	9.94	6.30	2.12
GLADSAXE	2.77	2.75	2.50	5.72	4.51	3.48	4.40	5.42	7.53	8.40	7.79	3.30

Måleperiode og måle højde er henholdsvis RISØ 1958-1967, 123 m; KASTRUP 1959-1967, 10 m; GLADSAXE 1/3 1974-29/2 1976, 200 m. Vindretningssektorerne er angivet ved sektormidten.

Ved uheld med lange udslipstider og vejr situationer med svag til jævn vind vil det tage adskillige timer for uheldsskyen først at komme ud af Barsebäck og dernæst at bevæge sig over Øresund og København. Vindretning, vindhastighed og stabilitetsforholdene vil højst sandsynlig have ændret sig i dette tidsrum. I appendiks 3 er der foretaget en vurdering af, hvorledes disse forhold influerer på hyppighederne. Man tænker sig, at der slip-  
pes et puf ud fra Barsebäck hver time, og undersøger, hvor mange af puffene, der rammer København. Ud fra vindhastigheden og vindretningen målt i et punkt (Risø, Kastrup eller Værløse) bestemmes den bane (trajektorie), ad hvilken puffet bevæger sig. Rammer puffet København inden for 12 timer efter udslippet, beregnes en tidlig middelvindhastighed og middelstabilitet langs



trajektorierne. I appendiks 3 er vist fordelingen af puf-trajektorierne efter længde, hastighed og stabilitet.

I tabel 5 vises hyppigheden for stabilitet F og D samt for alle stabiliteter. Tabellen viser observationshøjdernes indflydelse på tallene, samt at der er variationer stationerne imellem. Rimelige konservative skøn kan sættes til 1-2% for kategori F og 5-8% for kategori D. Da kategori D sammenfaldende med regn som nævnt i 4.1. er særlig interessant for dosisberegningerne, er der også foretaget en vurdering af hyppigheden af denne vejr-situation. Resultatet af beregningerne ses i tabel 6. Der er kun anvendt data fra Kastrup, idet det her er registreret, hvorvidt der har været nedbør i observationsperioden. Der forefindes også nedbørsmålinger blandt andet fra St. Hareskov, hvor nedbørsintensiteten er blevet registreret kontinuert. Ved udarbejdelsen af denne rapport forelå disse ikke på en umiddelbar tilgængelig form; når de engang gør det, kan de blive inddraget i vurderingerne.

Tabel 5

MÅLESTATION MÅLEHØJDE (m)		RISØ 123	RISØ 7	KASTRUP 10	VÆRLØSE 10
HYPPIGHED I PROCENT AF PUF-TRAJEKTORIER DER RAMMER KØBENHAVN UNDER ANGIVNE STABILITET	F	0.5	2.8	0.7	1.8
	D	4.4	7.4	10.7	10.9
	A L L E	12	17	18	20
HYPPIGHED I PROCENT AF TIDEN MED STABILITET D og NEDBØR SAMT					
1) HASTIGHED 0-7,5 m/sek				0.9	
2) ALLE HASTIGHEDER				2.3	

Måleperioderne er: RISØ 1958-1967; KASTRUP trajektorie-beregninger 1959-1968, nedbørsberegninger 1958-1972; VÆRLØSE 1959-1968.

Tabel 6

VINDHASTIGHED (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
%	0.00	0.00	0.06	0.10	0.21	0.21	0.30	0.35	0.36	0.23
VINDHASTIGHED (m/s)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
%	0.16	0.15	0.09	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Fordeling i procent på vindhastigheder af vejr-situationer med Pasquill D, vindretning fra 50 til 100 grader og nedbør i observationstiden. KASTRUP 1958-1972, i alt er anvendt 116711 observationer.

#### 4.4. Midlingstidens indflydelse på tids-middel koncentrationen.

De formelsæt, der benyttes såvel i WASH-1400 som i Risø-modellen til at beregne spredningsparametrene, er fastlagt ud fra forsøg, hvor der er anvendt midlingstider på fra 10 til 60 minutter.

Anvendes midlingstider, der er væsentlig større, vil fanens bredde forøges og koncentrationerne tilsvarende formindskes. Dette skyldes, at spredningen ved midlingstider på under 60 minutter er stærkt domineret af den tredimensionale atmosfæriske turbulens, medens den for længere midlingstider også påvirkes mærkbart af store horisontale hvirvler.

Dette forhold er der taget hensyn til i WASH-1400, idet den horisontale spredning er forøget med en faktor: (midlingstiden i timer: 0.5)<sup>1/3</sup>. Denne fremgangsmåde er også fulgt i Risø-modellen, selvom den ikke nødvendigvis altid er på den konservative side.

Under vejrforhold med let vind og stabilitetskategori F eller G, hvor turbulensen er meget svag, er det et velkendt fænomen, at de store horisontale hvirvler giver et betragteligt bidrag til spredningen. Denne effekt kaldes ofte "meandering-effekten", fordi de store hvirvler giver fanen et udseende som en bugtende flod. Effekten er i appendiks 3 søgt vurderet ud fra data målt såvel over land som over vand. En forøgelse af den horisontale spredning med en faktor 4 til 6 synes at være realistisk

under stabile vejrforhold med svag vind.

#### 4.5. Fanens højde over jorden.

Aktivitetsfrigørelsens varmeindhold og den hastighed, hvor- med varmeenergien frigøres, vil sammen med temperaturgradienten i atmosfærens nederste lag afgøre, hvor højt fanen vil stige til vejrs, som omtalt i appendiks 1. I tabel 7 er anført værdierne af varmeenergiens frigørelses-hastighed P, frigørelses-højden h og frigørelsestiden  $\tau$  for hver af de tre betragtede uheldskate- gorier. Tabellen viser fanens højde Z over jorden for de meteoro- logiske situationer, der er anvendt i beregningerne.

Tabel 7. Afstand mellem fanen og jordoverfladen for de betragtede meteorologiske situationer

Uhelds- kategori	Afstand mellem fanens centerlinje og jordoverfladen i meter											
	Pasquill A	Pasquill B	Pasquill C	Pasquill D				Pasquill E	Pasquill F			
	-2.7°C/100m	-1.8°C/100m	-1.6°C/100m	-1.0°C/100m				0.5°C/100m	2.75°C/100m			
	u=5m/s	u=5m/s	u=5m/s	1m/s	3m/s	5m/s	9m/s	u=5m/s	1m/s	2m/s	3m/s	5m/s
BWR1 P=3811W h=25m τ=0.5t	-	-	-	948*	332	209	127	-	-	174	-	-
BWR2 P=9MW h=0 τ=3h	77	77	77	-	129	77	77	92	116	92	80	68
BWR3 P=6MW h=25m τ=3h	-	-	-	-	126	-	-	-	-	105	-	-

\*1) For andre værdier af vindhastigheden ( $u_2$ ) beregnes fanens afstand ( $Z_2$ ) efter:

$$\text{ustabil og neutral atmosfære: } Z_2 = (Z_1 - h) \frac{u_1}{u_2} + h$$

$$\text{stabil atmosfære: } Z_2 = (Z_1 - h) \frac{u_1^{1/3}}{u_2^{1/3}} + h$$

## 5. PARAMETERSTUDIER MED WASH-1400 MODELLEN.

Risø's eget datamaskineprogram medfører relativt lange regnetider, hvorimod det program, der bygger på WASH-1400 modellen er relativt hurtigt. Sidstnævnte er derfor anvendt til parameterstudier og til at udvælge de situationer, der medfører de største doser. Disse situationer er herefter gennemregnet med Risø modellen, og resultaterne heraf indgår i rapportens konklusion.

Ved et parameterstudium forstås gennemførelse af en række beregninger, hvori væsentlige parametre varieres, hvorefter disses indflydelse på resultatet identificeres og kommenteres. De relevante parametre, der varieres her, er atmosfærens stabilitet, vindhastigheden, udskillelshastigheden, udvaskningskoefficienten samt uheldskategorien.

Ved parameterstudierne er anvendt beregning af knoglemarvsdosis, men valget af en anden organdosis ville vise den samme indflydelse af de varierede parametre.

I modsætning til beregningerne med Risø modellen, der giver doserne lodret under fanens centerlinie, giver beregningerne med WASH-1400 modellen middeldoserne inden for en sektorbredde på 3 gange den horizontale spredningsparameter.

### 5.1. Atmosfærens stabilitet.

På figur 1 er vist knoglemarvsdosis som følge af et BWR2 uheld under varierende stabilitetsforhold. Det fremgår af figuren, at når der som her er tale om et varmt udslip, hvor fanen stiger til en højde på ca. 100 meter, vil de største doser på større afstande optræde i den mest stabile vejr situation (Pasquill F). Det samme billede ville vise sig for BWR1- og BWR3-uheldene.

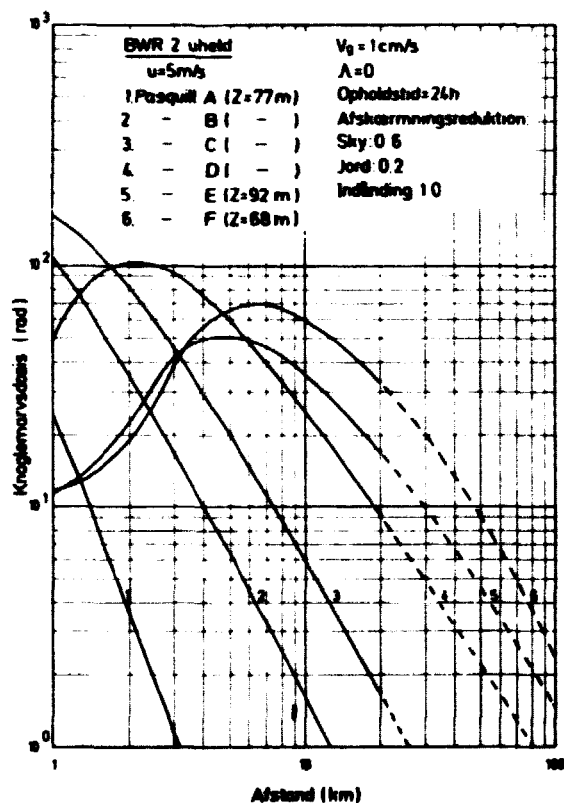


Fig.1 Knoglemarvsdosis fra BWR2 uheld ved forskellige stabilitetsforhold

Når det forudsættes, at der ikke er nedbør, er den alvorligste vejr situation for dosernes størrelse i København derfor Pasquill F. Da en regnvejrssituation er usandsynlig i forbindelse med stabilitetskategori F og E, er de efterfølgende parametervariationer foretaget for vejr situationerne Pasquill F uden nedbør og for Pasquill D kombineret med regn.

## 5.2. Stabilitetskategori F uden nedbør.

### 5.2.1. Uheldskategorien.

Figur 2 viser knoglemarvsdoserne beregnet for alle tre uheldskategorier, og det konstateres, at det er BWR2 uheldskategorien, som giver anledning til den største dosis i 20 kilometers afstand. Denne kategori benyttes derfor i de følgende parametervariationer.

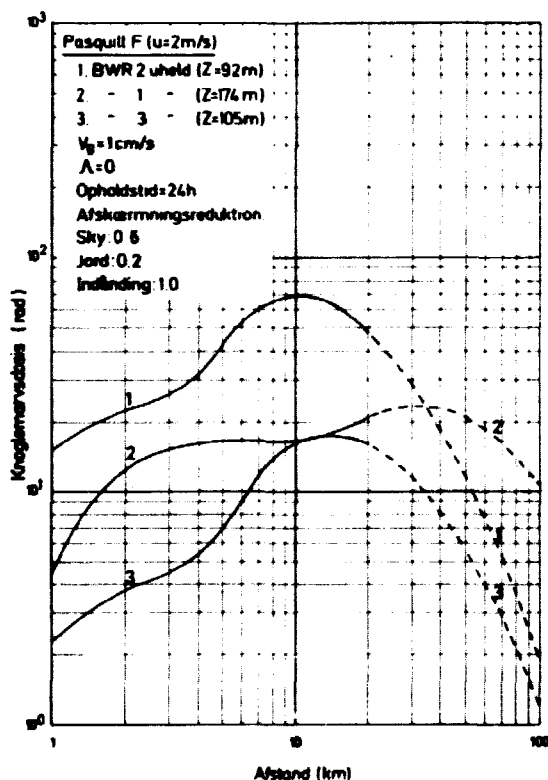


Fig. 2 Knoglemarvsdosis fra BWR 1-BWR 2 og BWR 3 uheld

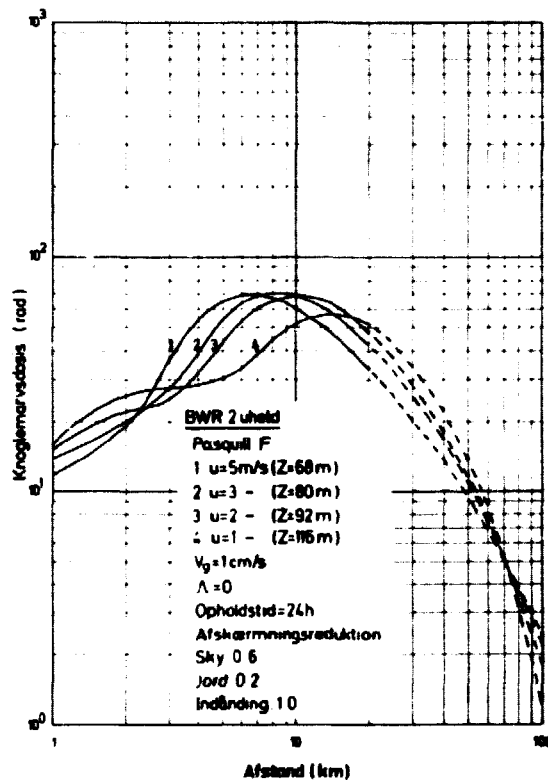


Fig. 3 Knoglemarvsdosis fra BWR 2 uheld ved forskellige vindhastigheder

### 5.2.2. Vindhastigheden.

Vindhastighedens indflydelse på dosernes størrelse skyldes primært, at den har indflydelse på følgende størrelser, jvf. appendiks 1 og 2: 1) spredning, 2) skyopstigning på grund af varmeindholdet i skyen, 3) udskillelse af aktivitet fra fanen som følge af tør- og våddeponering og 4) omfang af radioaktivt henfald undervejs.

Af den grund kan en vindhastighedsændring give anledning til både forøgede og formindskede doser, afhængig af afstanden fra frigørelsespunktet, hvilket fremgår af figur 3. For den ovenfor nævnte kombination af uheld og stabilitetskategori (BWR2 - Pasquill F) er dosernes størrelse dog relativt upåvirket af vindhastigheden.

### 5.2.3. Udskillelseshastigheden.

Tørdeponeringens indflydelse på dosernes størrelse er først og fremmest afhængig af, hvor højt fanens centerlinie befinder sig over jordoverfladen, men også vindhastigheden og atmosfærens stabilitet har betydning. For samme vindhastighed og centerlinieafstand over jorden, vil tørdeponeringens betydning for fanens fortynding blive mindre, når stabiliteten aftager (spredningen øges).

Med hensyn til betydningen af fanens afstand over jordoverfladen kan man generelt sige, at når fanens centerlinie befinder sig 100 meter eller mere over jordoverfladen, vil koncentrationen umiddelbart over jordoverfladen inden for 10-20 kilometer fra frigørelsesstedet stort set være upåvirket af relativt store ændringer af udskillelseshastigheden. Dette betyder, at den aktivitet, som udskilles på jordoverfladen inden for 10-20 kilometer fra frigørelsesstedet, tilnærmelsesvis vil være proportional med udskillelseshastigheden. Dette er illustreret i figur 4. Her fremgår det, at inden for de første få kilometer fra frigørelsesstedet, hvor koncentrationen umiddelbart over jordoverfladen praktisk talt er negligerbar, dominerer den eksterne gammadosis fra fanen, der er upåvirket af en variation i udskillelseshastigheden på en faktor 25. På afstande fra ca. 3-20 kilometer, hvor luftkoncentrationen ved jordoverfladen har betydning, forøges gammadosen med bidrag fra den deponerede aktivitet, der stort set forøges proportionalt med udskillelseshastigheden.

Omvendt stiller det sig, hvis fanens centerlinie ligger langs jordoverfladen (koldt udslip). I denne situation, hvor udslippet antages at være i temperaturligevægt med omgivelserne, er fanens fortynding særdeles følsom overfor variationer i udskillelseshastigheden. Her vil det i de fleste tilfælde gælde,

at doserne øges, når udskilleleshastigheden formindskes, hvilket skyldes, at fortyndingen af fanen mindskes kraftigt, når udskilleleshastigheden mindskes. Figur 5 illustrerer dette for en variation af udskilleleshastigheden på en faktor 25. Det samme gør sig gældende for et varmt udslip på større afstande, jvf. figur 4.

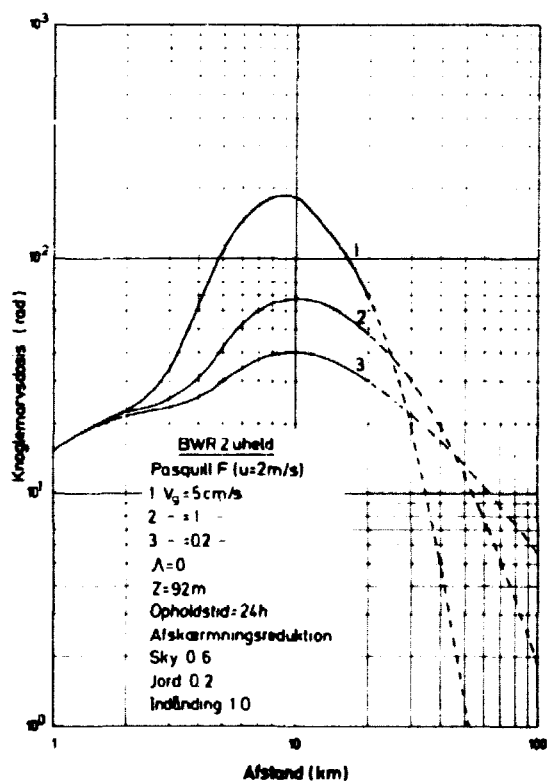


Fig 4 Knoglemarvsdosis, varmt udslip

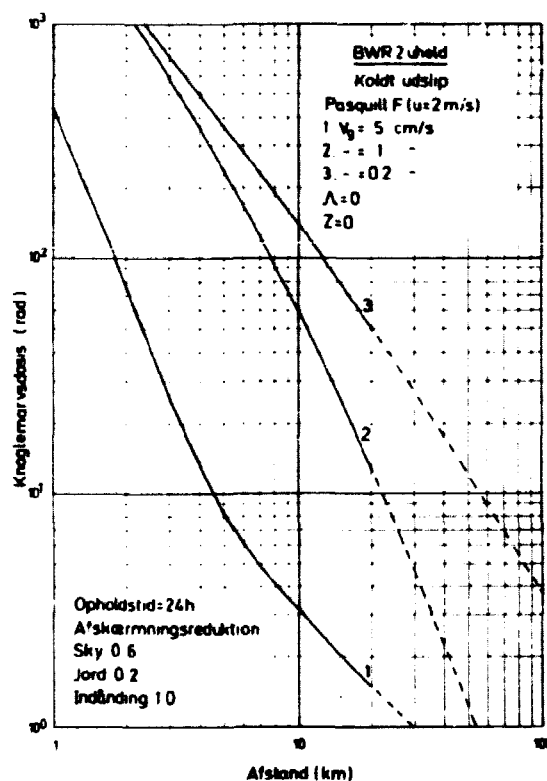


Fig 5 Knoglemarvsdosis, koldt udslip

Hvis den frigjorte aktivitet derfor overvejende består af deponerbare isotoper, vil et koldt udslip under stabile vejrforhold forårsage mindre doser på større afstande fra frigørelsesstedet end et tilsvarende varmt udslip.

Forsøgsmålinger viser, at udskilleleshastigheden  $V_g$  normalt ligger i området 0.1-5 cm/s afhængig af overfladens ruhed, atmosfærens stabilitet og arten af det pågældende stof [7]. I alle beregningerne i denne rapport er der som i WASH-1400 anvendt en værdi på 1 cm/s.





aktivitet bliver liggende på jordoverfladen og ikke delvis bortskylles af regnen.

### 5.3.2. Vindhastigheden.

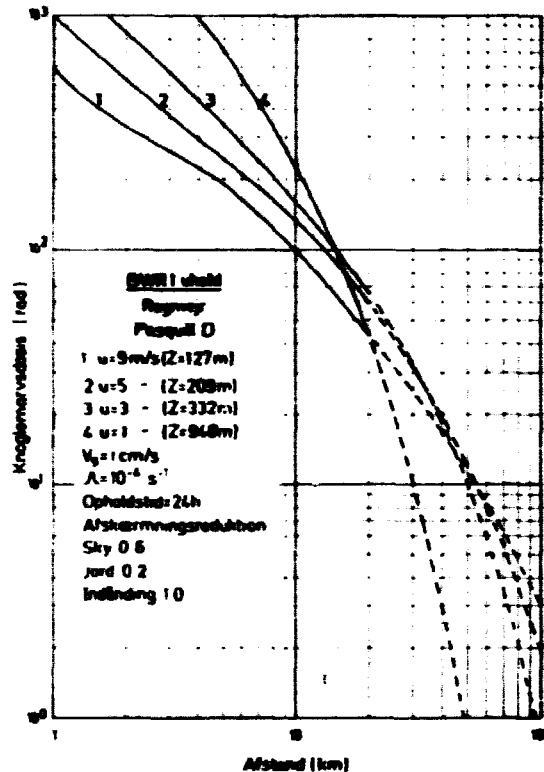


Fig 7 Knoglemarvsdosis fra BWR1 uheld ved forskellige vindhastigheder

Figur 7 viser den akutte knoglemarvsdosis fra et BWR1 uheld i en vejr situation med regn og for forskellige vindhastigheder. Af figuren fremgår det, at en vindhastighed på 3 m/s giver den største knoglemarvsdosis i 20 kilometers afstand fra frigørelsesstedet, men i øvrigt at vindhastighedens indflydelse også i denne vejr situation er af mindre betydning.

### 5.3.3. Udvaskningskoefficienten.

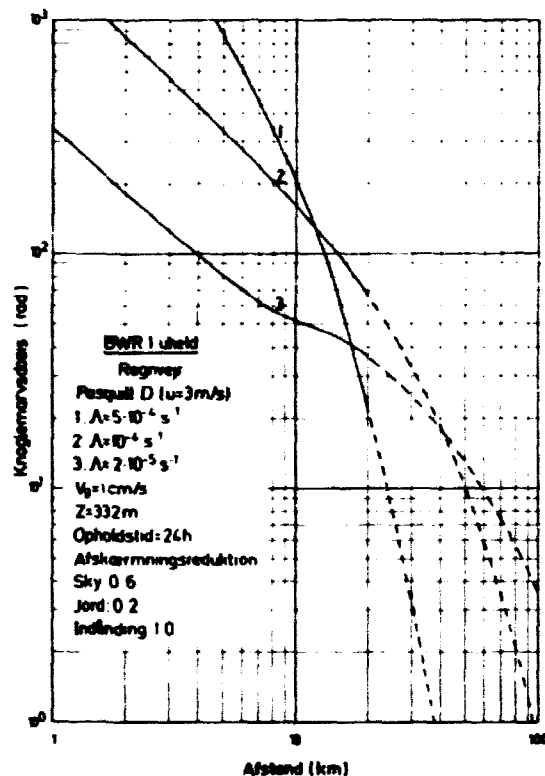


Fig. 8 Knoglemarvskons fra BWR1 uheld ved forskellige udvaskningskoefficienter

Figur 8 viser udvaskningskoefficienten  $\Lambda$ 's indflydelse på dosernes størrelse. Man iagttager samme tendens som ved tørdeponeringen, nemlig at det først er på større afstande, hvor fortyndingen af fanen på grund af udvaskning bliver signifikant, at doserne aftager med voksende udvaskningskoefficient. På kortere afstande, hvor fortyndingen endnu ikke er mærkbar, er knoglemarvsdoserne fra den udvaskede aktivitet stort set proportional med udvaskningskoefficienten. Det er i øvrigt ikke kritisk, hvor højt fanen ligger, idet det må antages, at regnen i de fleste tilfælde falder fra højder, som er meget større end fanens afstand over jorden. Udvaskningen sker derfor over hele fanens højde. Udvaskningskoefficientens størrelse er en funktion af regnintensiteten og ligger normalt i området  $10^{-5} - 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  [3]. I alle beregninger i denne rapport er der som i WASH-1400 anvendt en værdi på  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

## 6. DOSISBEREGNINGER MED RISØ MODELLEN.

Som nærmere omtalt i afsnit 4.1 har det ikke været muligt - som det er gjort i det arbejde, der ligger til grund for WASH-1400 - at gennemregne doserne for en lang serie vejr-situationer. I stedet er der gennemført beregninger af doser for de kombinationer af uheld og vejr-situationer, som vides at give store doser, og som ikke optræder med en forsvindende sandsynlighed.

Af de parameterstudier, der er omtalt i afsnit 5, fremgår det, at de største knoglemarvsdoser i 20 km's afstand fås ved kombinationerne BWR2 uheld, Pasquill F og en vindhastighed på 2 m/s samt BWR1 uheld, Pasquill D med regn og en vindhastighed på 3 m/s.

De dosisberegninger, der er gennemført med Risø modellen, er derfor koncentreret om disse to tilfælde. Derudover er der dog også foretaget en beregning af organdoserne fra det mest sandsynlige af de tre betragtede uheld (BWR3) i den mest sandsynlige danske vejr-situation (Pasquill D).

De eksterne gammadoser er beregnet i luft umiddelbart ved kroppens overflade. Disse luftdoser (i rad) er som en god tilnærmelse anvendt som eksterne doser til knoglemarv, lunger, mave-tarmkanal og skjoldbruskkirtel.

Alle de efterfølgende afbildninger viser doserne lodret under fanens centerlinie, i modsætning til de foregående afbildninger, som viser middeldoserne inden for en sektorbredde på 3 gange den horisontale spredningsparameter.

### 6.1. BWR2, Pasquill F.

Figurerne 9 og 10 viser henholdsvis knoglemarvsdosisfordeling på dosiskomponenter og organdoserne fra et BWR2 uheld. Som nævnt tidligere er doserne beregnet ud fra den forudsætning, at man opholder sig indendørs under og 24 timer efter skyens passage og derefter forlader det forurenede område.

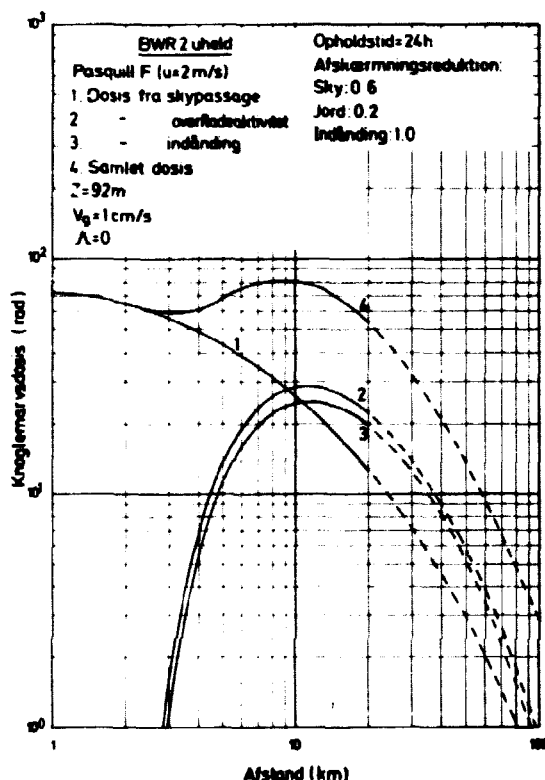


Fig 9 Knoglemarvsdosis fra BWR2 uheld fordelt på dosiskomponenter

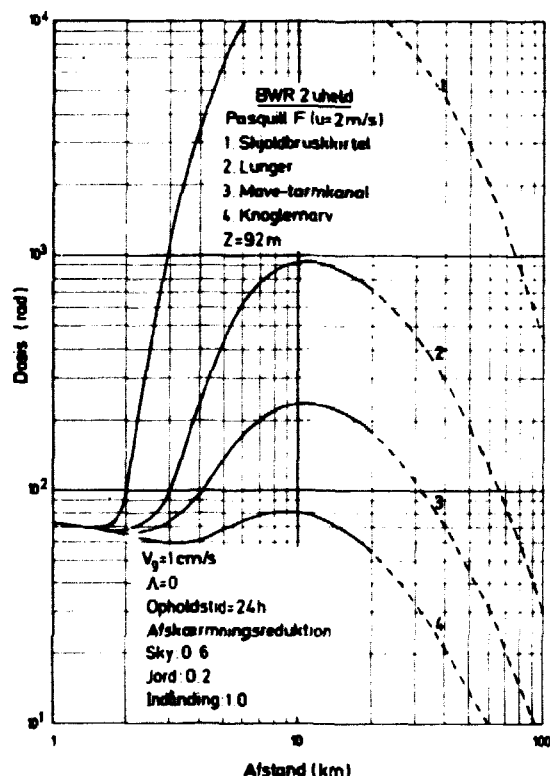


Fig 10 Organdoser fra BWR2 uheld

Doserne fra BWR2 uheldet er korrigeret på samme måde som i WASH-1400, d.v.s. reduceret med faktoren  $(3/0.5)^{1/3} = 1.82$  på grund af den tre timer lange frigørelsestid. I appendiks 3 er der foretaget en vurdering af effekten af de langsomme vinddrejninger, som ofte forekommer i stabile vejr situationer ("meandering"). Vurderingen viser, at doserne i 20 kilometers afstand under sådanne forhold snarere burde være reduceret med en faktor 4 til 6.

Figurerne 11 og 12 viser de tilsvarende knoglemarvsdoser henholdsvis 8 timer og 72 timer efter skyens passage og ved ophold henholdsvis inden- og udendørs i disse tidsrum.

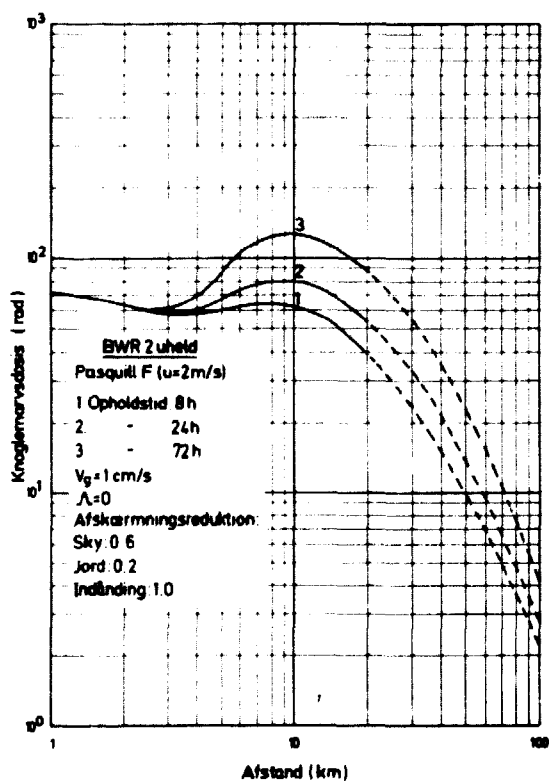


Fig.11 Knoglemarvsdosis fra BWR 2 uheld med afskærmningsreduktion

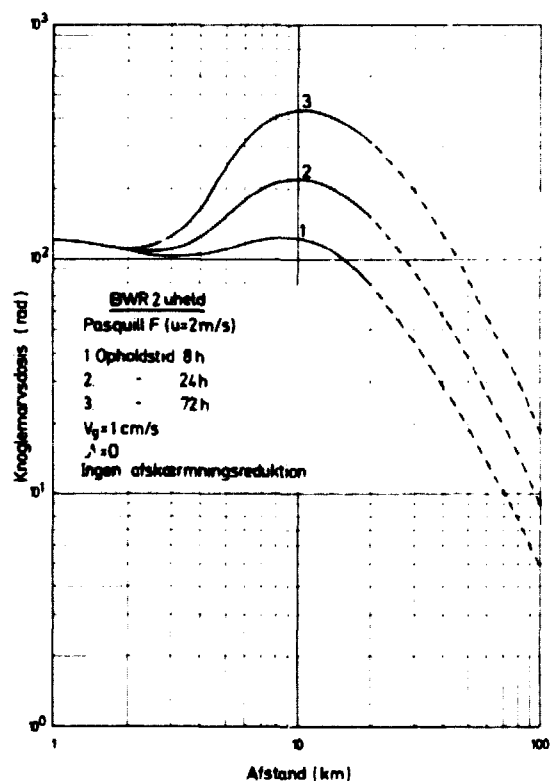


Fig.12 Knoglemarvsdosis fra BWR 2 uheld uden afskærmningsreduktion

Dosistilvæksten vist på disse figurer skyldes gammastrålingen fra den deponerede aktivitet på jordoverfladen.

For at få et indtryk af tidsvariationen af dosen fra overfladeaktiviteten er denne beregnet i 2 afstande fra frigørelsesstedet som funktion af tiden frem til 168 timer (1 uge) efter skyens passage og vist på figur 13.

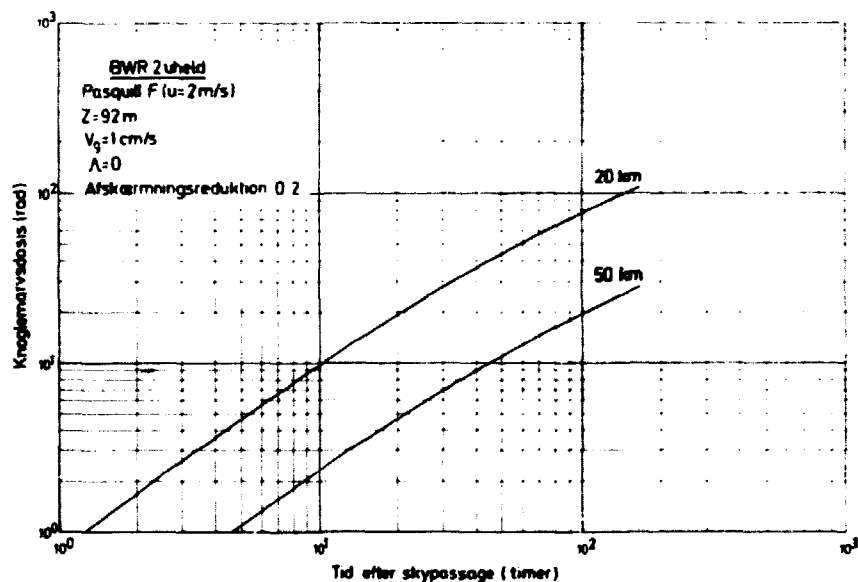


Fig 13 Akkumuleret knoglemarvsdosis fra deponeret aktivitet

Indåndingsdosen til knoglemarven er som nævnt under afsnit 3.6. beregnet som summen af indåndingsdosen efter 7 dage og halvdelen af indåndingsdosen fra den 8. til den 30. dag efter indåndingen af aktiviteten.

For ligeledes at få et indtryk af indåndingsdosisens tidsvariation er denne beregnet i 2 afstande fra frigørelsesstedet som funktion af tiden frem til ca. 30 år efter indåndingen af aktiviteten og vist på figur 14.

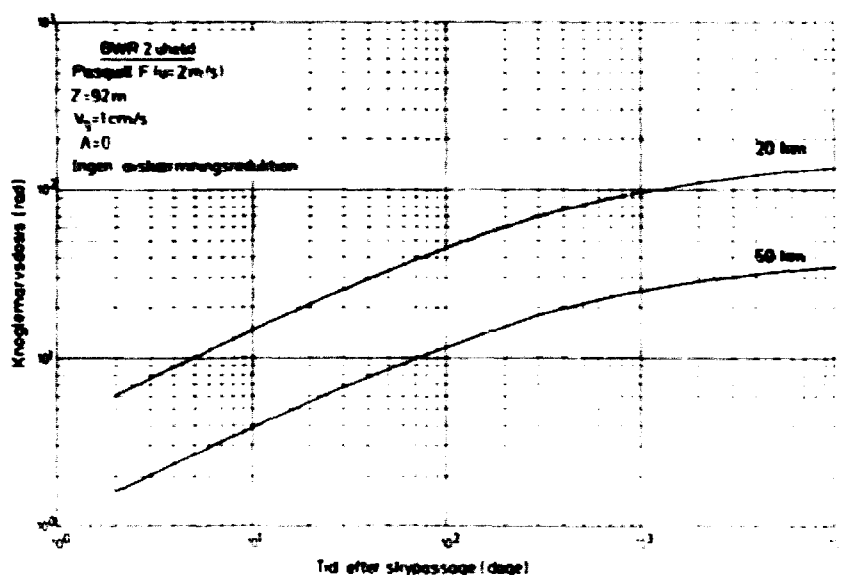


Fig 14. Akkumuleret knoglemarvsdosis fra indåndet aktivitet.

De akkumulerede befolkningsdoser fra et BWR2 uheld er angivet i tabel 8 i afsnit 6.2.

Som vist på figur 3 er knoglemarvsdosen i 20 kilometers afstand relativ ufølsom over for vindhastighedsændringer. Sandsynligheden for at have en vejr-situation, der ved et BWR2 uheld på Barsebäck kan medføre doser i København af samme størrelsesorden som vist på figurerne 9-12, bliver ca. 0.005, når vindhastigheder til og med 5 m/s medregnes. Den årlige sandsynlighed for at få de pågældende doser i København bliver derved  $3 \cdot 10^{-8}$  (hvilket svarer til en gang i gennemsnit pr. ca. 30 000 000 reaktordriftsår), når uheldsfrekvensen for et BWR2 uheld fra WASH-1400 anvendes (én gang pr. 170 000 reaktordriftsår). Forskelle mellem sikkerhedssystemerne for Barsebäck og Peach Bottom reaktorerne vil dog kunne påvirke denne sandsynlighed.



## 6.2. BWR1. Pasquill D og regn.

Figurerne 15 og 16 viser henholdsvis knoglemarvsdosens sammensætning på dosiskomponenter og organdoserne fra et BWR1 uheld ved Pasquill D og regnvej med en vindhastighed på 3 m/s. Forudsætningerne om opholdstiden er de samme som i afsnit 6.1.

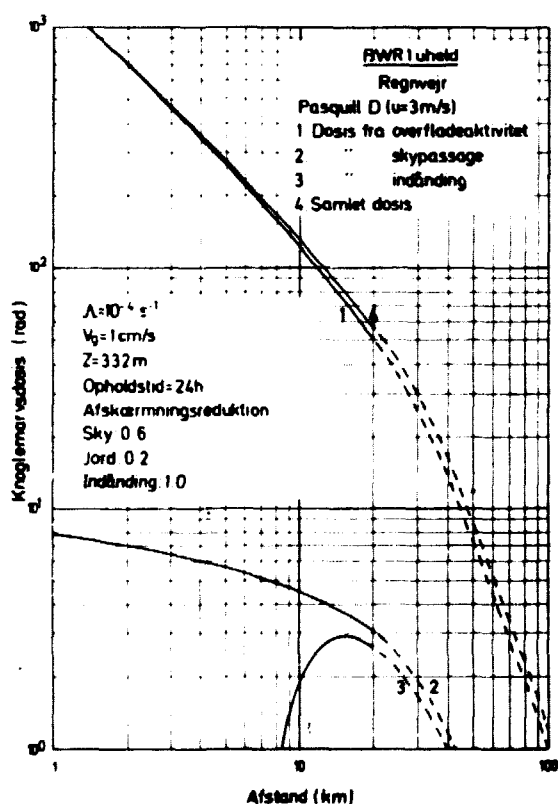


Fig 15 Knoglemarvsdosis fra BWR1 uheld fordelt på dosiskomponenter

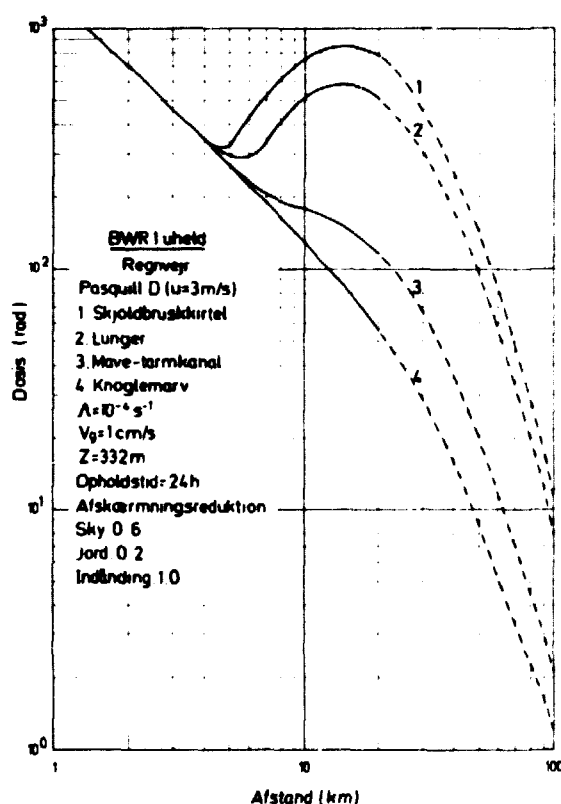


Fig 16 Organdoser fra BWR1 uheld

Doserne fra samme uheld, men ved en opholdstid på henholdsvis 8 timer og 72 timer efter skyens passage samt ved ophold henholdsvis inden- og udendørs i disse tidsperioder er vist på figurerne 17 og 18.

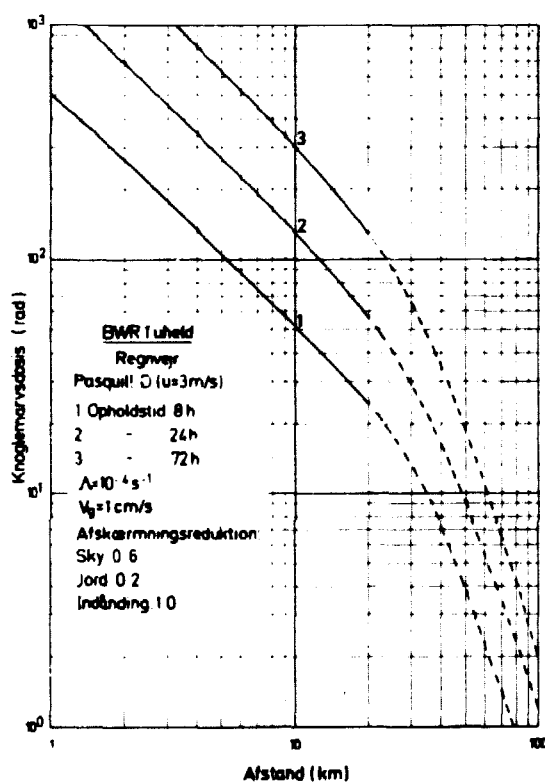


Fig. 17 Knoelemarvsskade fra BWR1 uheld med afskærmningsreduktion

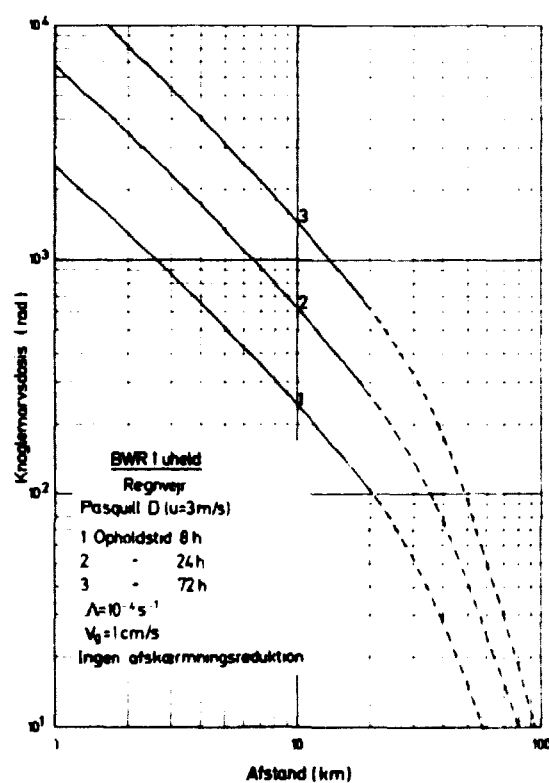


Fig. 18 Knoelemarvsskade fra BWR1 uheld uden afskærmningsreduktion

Knoglemarvsdosen fra gammastrålingen fra den udvaskede aktivitet er vist på figur 19 for 2 afstande fra frigørelsesstedet som funktion af tiden frem til 168 timer efter skyens passage.

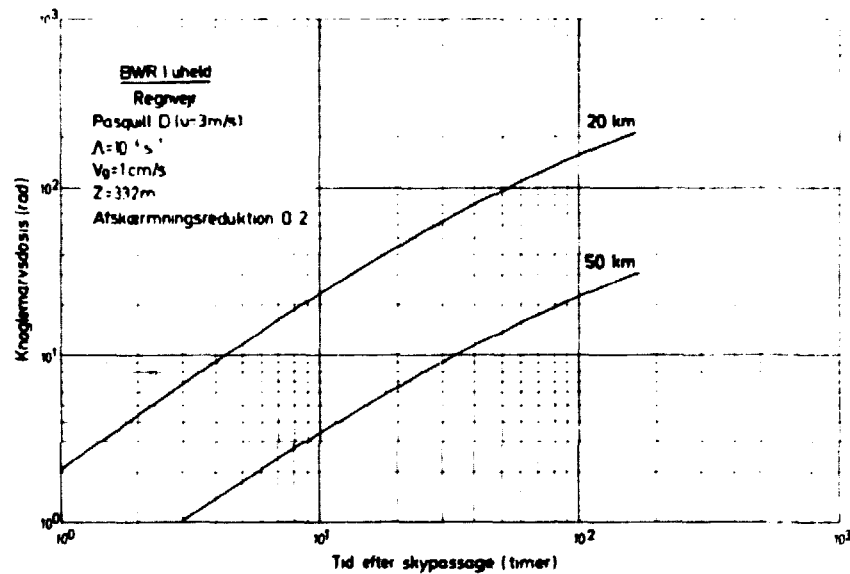


Fig 19 Akkumuleret knoglemarvsdosis fra deponeret aktivitet

Knoglemarvsdosen fra indåndet aktivitet er vist på figur 20 som funktion af tiden frem til ca. 30 år efter indåndingen af aktiviteten.

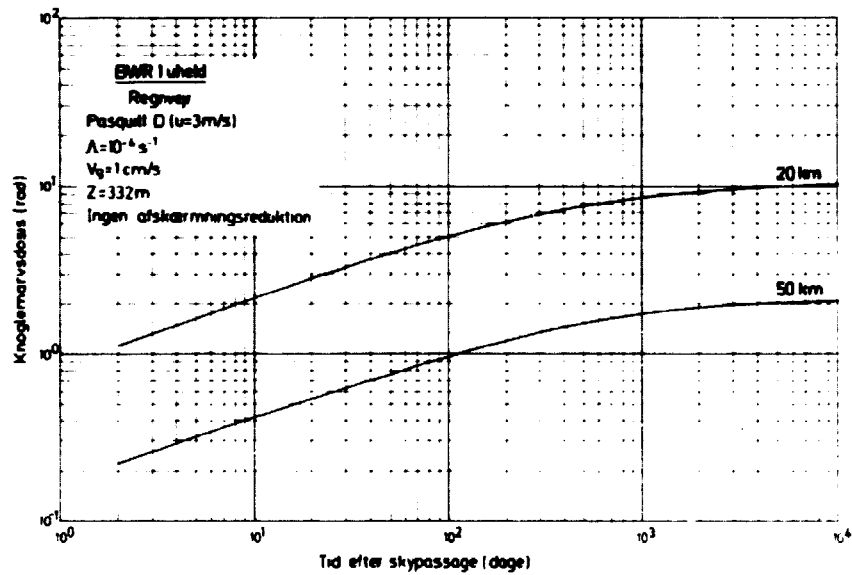


Fig 20 Akkumuleret knoglemarvsdosis fra indåndet aktivitet

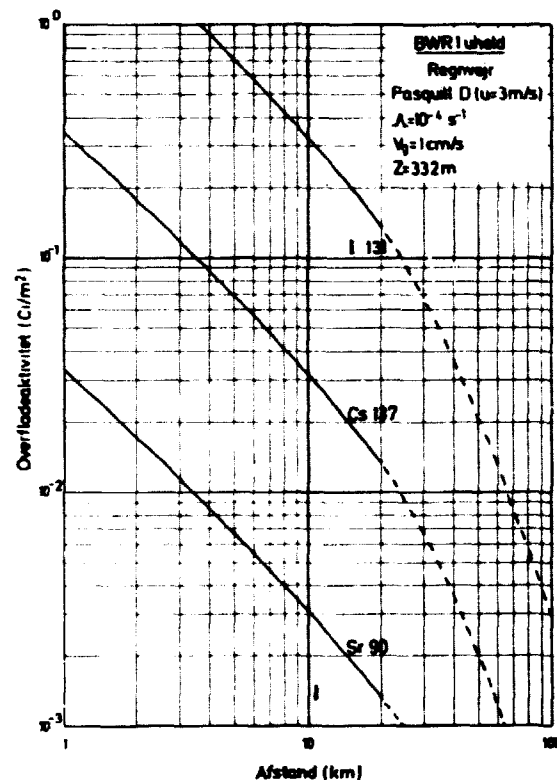


Fig 21 Forureningsniveauer fra BWR1 uheld

Figur 21 viser forureningsniveauerne ved et BWR1 uheld for nogle kritiske isotoper umiddelbart efter skyens passage. Hvis intet andet foretages, vil aktivitetsniveauet efterhånden reduceres på grund af radioaktivt henfald og andre fjernelsesmekanismer, såsom nedsivning med regnvand etc.

Tabel 8 viser de akkumulerede befolkningsdoser fra BWR1 og BWR2 uheld under de tidligere beskrevne vejsituationer. I beregningen af befolkningsdoserne er anvendt gennemsnitlige afskærmningsfaktorer (se afsnit 3.3. og 3.4). Doserne vist i tabel 8 er derfor dem, som optræder i det storkøbenhavnske område,

forudsat at der ingen foranstaltninger iværksættes de første 8, 24 eller 72 timer efter skyens passage, og forudsat østlig vindretning med de givne meteorologiske betingelser. Bemærk at indåndingsdoserne er integreret over 50 år, hvilket medfører, at doserne bliver større for BWR2 uheldet end for BWR1 uheldet.

Tabel 8. Akkumulerede befolkningsdoser fra BWR1- og BWR2-uheld

Befolkningsdosis (mandrad)						
Organ	Opholdstid efter skypassage					
	8 timer		24 timer		72 timer	
	BWR1	BWR2	BWR1	BWR2	BWR1	BWR2
Knoglemarv	1.0 E7	3.3 E7	2.2 E7	4.0 E7	4.9 E7	5.6 E7
Lunger	1.3 E8	1.7 E8	1.4 E8	1.8 E8	1.7 E8	2.0 E8
Mave-tarmkanal	2.1 E7	3.7 E7	3.2 E7	4.3 E7	5.9 E7	5.9 E7
Skjoldbruskkirtel	1.6 E8	2.4 E9	1.7 E8	2.4 E9	1.9 E8	2.4 E9

Indåndingsdoserne er integreret over 50 år

Afskærmningsfaktorer: 0.33 for stråling fra deponeret aktivitet

0.75 for stråling fra passerende sky

Befolkningsdoserne er akkumuleret til en afstand på 100 kilometer og beregnet på grundlag af befolkningsprognose for 1985

For BWR1 uheldet er der foretaget en beregning af betadosen i luft i én meters afstand over jordoverfladen både fra beta-strålingen fra fanen og fra den udvaskede aktivitet. Beregningen er foretaget for afstanden 20 kilometer fra frigørelsesstedet.

Betaenergiområdet for de betragtede isotoper (0 - 4 MeV maksimal betaenergi) er inddelt i 9 energigrupper som vist i tabel 9, og fordelingen af de enkelte isotopers energiudbytter i disse grupper er vist i tabel 10.

Tabel 9. Maksimale betaenergier opdelt i energigrupper

Gruppe nr.	Energigrænser	Gruppeenergi (MeV)
1	0 - 0.10	0.05
2	0.10 - 0.20	0.15
3	0.20 - 0.40	0.30
4	0.40 - 0.70	0.55
5	0.70 - 1.00	0.85
6	1.00 - 1.50	1.25
7	1.50 - 2.00	1.75
8	2.00 - 3.00	2.50
9	3.00 - 4.00	3.50

Tabel 10. Betaenergiudbytter fordelt på energigrupper

Isotop	Betaenergiudbytter (partikler $\text{dis}^{-1}$ )								
	Energigruppe nr.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kr 85				1.0					
Kr 85m					1.0				
Kr 87						0.25			0.75
Kr 86				0.68	0.12			0.20	
Rb 86					0.09		0.97		
Sr 89						1.0			
Sr 90				1.0					
Sr 91				0.07		0.42			0.50
Y 90									1.0
Y 91			0.003				0.997		
Zr 95			0.43	0.55	0.02	0.004			
Zr 97							1.0		
Nb 95		0.99			0.01				
Mo 99				0.14	0.03	0.83			
Ru 103			0.99	0.01					
Ru 105						0.89	0.11		
Ru 106									
Rh 105			0.10	0.70					
Te 127					1.0				
Te 129						1.0			
Te 129m							1.0		
Te 131m			0.04	0.74				0.04	
Te 132			1.0						
Sb 127					0.50	0.20	0.30		
Sb 129							0.20		
I 131			0.12	0.87	0.007				
I 132					0.21	0.19	0.21	0.18	
I 133				0.09		0.91			
I 134						0.18	0.005	0.37	
I 135				0.35		0.65			
Xe 133			1.0						
Xe 135				0.03	0.97				
Cs 134	0.28			0.72					
Cs 136			0.43						
Cs 137				0.935		0.065			
Ba 140				0.40		0.60			
La 140				0.16	0.12	0.50	0.14	0.08	
Ce 141				1.0					
Ce 142				0.12	0.05	0.77			
Ce 144		0.30	0.70						
Pr 143					1.0				
Nd 147			0.23		0.76				
Np 239			0.41	0.52	0.07				
Pu 241	1.0								

Dosisberegningen er udført på grundlag af principperne i ref. 7. Ud fra kendskabet til betadosens fordeling i de enkelte energigrupper (for luft) er det muligt at give et skøn over hud-dosens og over gonadedosens størrelse fra betastrålingen.

Tabel 11. Betadoser i luft fra aktivitetstætnen i 20 km's afstand fra frigørelsesstedet  
M&M shield - Pasquill G - 2 x 3 km - regnorm

Betadosis (rad)									
Isotop	Energigruppe nr.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fr 45				7,94E-1					
Fr 85m					2,47E-1				
Fr 97				1,91E-1	5,24E-2	1,4E-2		2,58E-1	3,02E-1
Fr 98					2,11E-2		4,47E-5		
Fr 99							4,14E-2		
Fr 91				4,54E-1					
Se 74				1,75E-3		3,52E-2		1,43E-1	
Y 90								7,78E-4	
Y 91			8,14E-4						
Zr 95			7,43E-4	1,81E-3	1,71E-4	2,99E-5			
Zr 97							9,49E-1		
Ne 99		8,99E-4			1,79E-1				
Ne 100				4,78E-2	1,58E-2	4,44E-1			
Ne 101			1,18E-1	2,43E-1					
Ne 105						1,21E-1	2,11E-2		
Ne 106			2,52E-2						
Ne 109			4,42E-2	1,12E-1					
Te 127					2,79E-4				
Te 128						4,91E-5			
Te 129m							4,43E-2		
Te 130m								4,47E-1	
Se 132			8,11E-4	2,72E-2					
Se 134			1,94E-1						
Se 137					4,44E-1	4,47E-3	1,78E-2		
Se 139							1,22E-2		
I 131			1,05E-2	1,40E-1	1,74E-1	1,12E-1	4,49E-2	1,78E-1	
I 132				1,68E-2	4,12E-2		5,07E-1		
I 133						1,27E-2	4,13E-4	4,17E-2	
I 134						2,94E-1			
I 135									
Xe 133			8,40E-1						
Xe 135				1,57E-2	7,47E-3				
La 138	2,46E-4			7,54E-1					
La 139			1,45E-1	1,59E-4					
La 140				1,44E-2		2,31E-3			
La 141				1,17E-2		4,44E-2			
La 142				5,44E-4	4,32E-4	1,98E-1	1,52E-1	1,24E-1	
La 143				3,22E-1					
La 144				7,34E-4	2,17E-4	1,49E-1			
La 145		2,34E-4	3,52E-4						
Pr 143						4,44E-1			
Pr 144						1,54E-1			
Pr 147			1,44E-4	1,74E-2	4,09E-1				
Pr 148			4,83E-1						
Pu 242	7,11E-4								
Sum	2,73E-4	1,79E-1	2,27	7,04E-1	1,99E-1	2,12	2,17E-1	4,44E-1	1,77E-1
Total	5,4 rad $F_{max}$ 1,9 rad $F_{100cm}$								
Sum/ total	5,1E-1%	2,0E-1%	21,4%	11,1%	7,4%	17,5%	4,5%	8,7%	1,4%

Tabellerne 11 og 12 viser henholdsvis den samlede betadosis i luft fra fanens passage og begyndelsesdosishastigheden i luft fra aktiviteten på jordoverfladen umiddelbart efter fanens passage. Anvendes de relevante dæmpningsfaktorer i hver energigruppe fra luftdosis til henholdsvis huddosis til det følsomme hudlag (dybde 7 mg cm<sup>-2</sup>) og gonadedosis (dybde 100 mg cm<sup>-2</sup>) får man følgende doser: 1 rad og 40 rad/time til huden og 0.1 rad og 6 rad/time til gonaderne fra henholdsvis fanens passage og



overfladeaktiviteten. Disse værdier skal sammenlignes med dosisbidragene fra gammastrålingen som udgør henholdsvis ca. 5 rad og ca. 18 rad/time. Det ses, at betadosen ikke bidrager væsentligt til gonadedosen, hvorimod huddosen stort set tredobles på grund af betadosen. Det skal dog understreges, at det er konservativt kun at anvende en dybde på  $100 \text{ mg cm}^{-2}$  i gonadedosisberegningen. Hertil kommer tøjets afskærmning, der givetvis vil dæmpe mere end  $100 \text{ mg cm}^{-2}$  væv, således at en realistisk gonadedosis snarere vil udgøre omkring 10% af de angivne værdier.

Tabel 12. Betadosis-hastigheder i luft fra udvasket aktivitet i 20 km's afstand fra frigørelsesstedet  
MØU uheld - Pasquill D - u = 3 m/s - regnvejr

Isotop	Betadosis-hastighed ( $\text{radh}^{-1}$ )								
	Energigruppe nr.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rb 86					$7.2E-6$		$3.5E-3$		
Sr 89						$1.30$			
Sr 90				$3.7E-5$					
Sr 91				$6.1E-5$		$9.76E-1$		$4.01$	
Y 90								$1.1E-1$	
Y 91							$6.37E-1$		
Zr 95				$4.27E-5$	$3.43E-4$	$8.59E-4$			
Zr 97					$1.73E-4$		$7.72E-1$		
Nb 95					$1.73E-4$				
Mo 99				$1.13E-3$	$5.35E-2$	$1.85E-1$			
Pu 101				$6.91E-5$					
Ru 105						$1.41$	$1.85$		
Ru 106									
Rh 105				$2.68E-3$					
Te 127					$7.75E-2$				
Te 129						$2.18$			
Te 129m							$3.75$		
Te 131m				$6.19E-4$				$8.0E-1$	
Te 132									
Sb 127					$2.86E-2$	$1.43E-1$	$8.19E-1$		
Sb 129							$2.52$		
I 131				$3.32E-3$	$5.91E-1$	$7.29$	$1.54E-1$	$2.81E-1$	
I 132					$1.14E-1$				
I 133				$5.82E-4$		$1.67E-1$			
I 134						$7.78E-1$	$4.00E-2$	$6.33$	
I 135				$1.62E-3$		$8.11$			
Cs 134				$1.78E-4$					
Cs 136				$4.72E-6$					
Cs 137				$3.49E-4$		$6.73E-2$			
Ba 140				$1.25E-4$		$1.15$			
La 140				$1.73E-5$	$2.87E-3$	$1.50E-1$	$1.64E-1$	$2.00E-1$	
Ce 141				$7.61E-5$					
Ce 143				$7.92E-6$	$7.31E-4$	$1.41E-1$			
Ce 144									
Pr 143					$1.59E-2$				
Nd 147					$5.22E-1$				
U 239				$4.62E-4$	$1.38E-2$				
Pa 241									
Sum	0	0	0	$1.16E-2$	$5.19E-1$	$67.9$	$25.8$	$39.6$	0
Total	$127 \text{ radh}^{-1} (E_{\text{max}}) \sim 42 \text{ radh}^{-1} (E_{\text{middel}})$								
Sum/ Total	0	0	0	0.01%	0.4%	47.9%	20.3%	31.2%	0

Som vist på figur 7 er knoglemarvsdosen i 20 kilometers afstand ret ufølsom over for vindhastighedsændringer. Sandsynligheden for at have stabilitetskategori D med nedbør, en vindretning mellem  $50^\circ$  og  $100^\circ$  og en vindhastighed mellem 1 og 9 m/s kan med god tilnærmelse vurderes ud fra en simpel vindrosesta-

tistik og kan ud fra målingerne i Kastrup (tabel 6) beregnes til 0.016. Den årlige sandsynlighed for ved et BWR1 uheld i Barsebäck at få doser i København af samme størrelsesorden som vist på figurerne 15-18 bliver derved  $1.6 \cdot 10^{-8}$  (hvilket svarer til én gang i gennemsnit pr. ca. 60 000 000 reaktordriftsår), når uheldsfrekvensen for et BWR1 uheld fra WASH-1400 anvendes (én gang pr. 1 000 000 reaktordriftsår). Forskelle mellem sikkerhedssystemerne for Barsebäck og Peach Bottom reaktorerne vil dog kunne påvirke denne sandsynlighed.

### 6.3. BWR3, Pasquill D.

På figur 22 er vist organdoser fra det mest sandsynlige (i følge WASH-1400) af de tre betragtede uheld (BWR3) i den mest sandsynlige danske vejr-situation, stabilitetskategori D og en vindhastighed på 8 m/s [8]. I henhold til appendiks 3 er sandsynligheden for, at vinden fører den radioaktive sky fra Barsebäck til København 0.1-0.15, og kun under sådanne omstændigheder kan doserne i København være af betydning.

Ifølge WASH-1400 kan et BWR3 uheld forventes at ske én gang i gennemsnit pr. 50 000 reaktordriftsår.

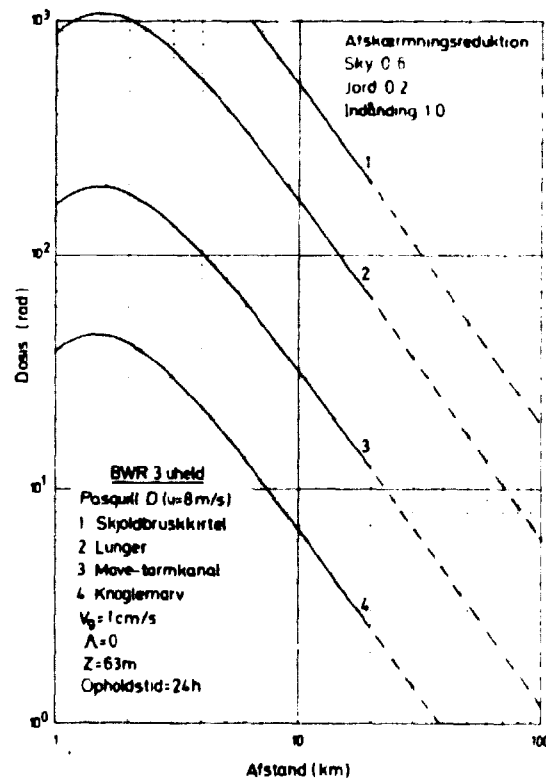


Fig 22 Organdoser fra BWR3 uheld

## 7. SAMMENLIGNING AF RESULTATER FRA RISØ- OG WASH-1400 MODELLEN

En sammenligning af knoglemarvsdosen fra et BWR2 uheld beregnet med henholdsvis Risø- og WASH-1400 modellen er foretaget på figur 23.

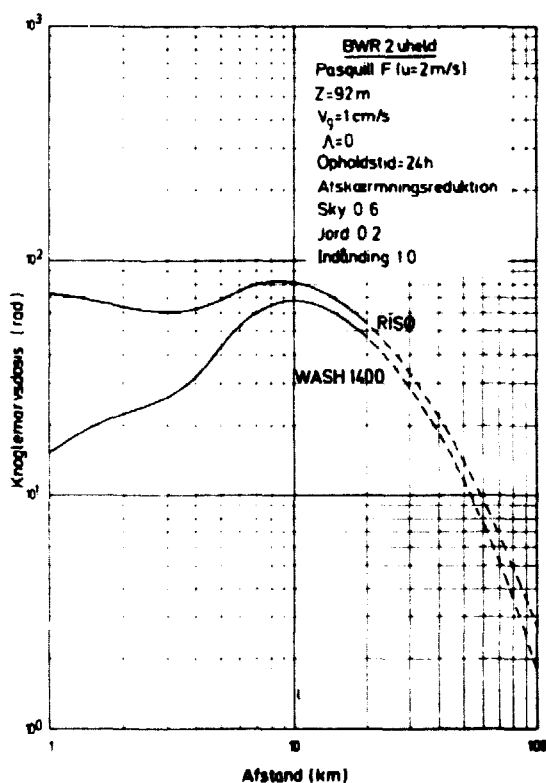


Fig 23 Knoglemarvsdosis fra BWR 2 uheld

Som det fremgår af figur 23 er dosen beregnet med Risø modellen forskellig fra dosen beregnet med WASH-1400 modellen især på korte afstande fra frigørelsesstedet. Denne forskel kan hovedsagelig tilskrives følgende forhold:

- 1) Indåndingshastigheden for voksne er i WASH-1400 sat til 16 liter luft pr. minut, medens den i Risø's model er sat til 21 liter pr. minut, som angivet i ICRP 2 [9] for en 8 timers arbejdsdag. Da mennesker må formodes at være mere aktive i en uheldssituation, har WASH-1400 anvendt en indåndingshastighed, der er 15% større end gennemsnittet for hele døgnet, mens man i Risø modellen har fundet det rimeligt at anvende den, der gælder for arbejdstiden.
- 2) Aktivitetskoncentrationen ved jordoverflader beregnet med WASH-1400 modellen er ca. 84% af den tilsvarende koncentration under fanens centerlinie beregnet med Risø modellen. I WASH-1400 modellen antages det som tidligere nævnt, at koncentrationen er konstant på tværs af vindretningen indenfor en sektorbredde på 3 gange den horisontale spredningsparameter. Risø modellen antager en gaussisk fordeling på tværs af vindretningen. Langs kanten af den i WASH-1400 benyttede sektor er den beregnede koncentration med Risø modellen ca. 38% af den tilsvarende koncentration beregnet med WASH-1400 modellen.
- 3) Forskelle mellem dosisomsætningsfaktorer fra overfladeaktivitet til dosishastighed, herunder bidrag fra "back-scattering", som ikke er medtaget i Risø modellen.

Hvis der i Risø's beregningsmodel havde været anvendt den samme udbredelsesmodel, den samme indåndingshastighed og de samme dosisomsætningsfaktorer fra overfladeaktivitet til dosishastighed som i WASH-1400, ville indåndingsdosen og de eksterne gamma-doser vist på figur 9 have været henholdsvis 1.57 og 1.19 gange mindre.

Selv om der tages hensyn til ovennævnte forhold er der stadig en væsentlig forskel mellem de eksterne gammadoser fra fanens passage på korte afstande fra frigørelsesstedet. Dette må tillægges de forskellige beregningsmetoder, jvf. appendiks 1 og 2. I Risø modellen foretages en rumlig integration over fanens volumen, hvorimod WASH-1400 modellen som en tilnærmelse anvender en korrektionsfaktor, der beskriver forholdet mellem dosen fra en uendelig stor sky som indeholder en jævnt fordelt aktivitet og dosen fra en tilsvarende sky med endelige dimensioner.

Da Risø modellens beregningsmetode er matematisk mere rigtig end WASH-1400 modellens tilnærmelse, må de med Risø modellen beregnede eksterne gammadoser fra fanen anses for at være de mest korrekte. Som det fremgår af figur 24, er der bedre overensstemmelse mellem de tilsvarende beregninger af knoglemarvsdosen fra et BWR1 uheld.

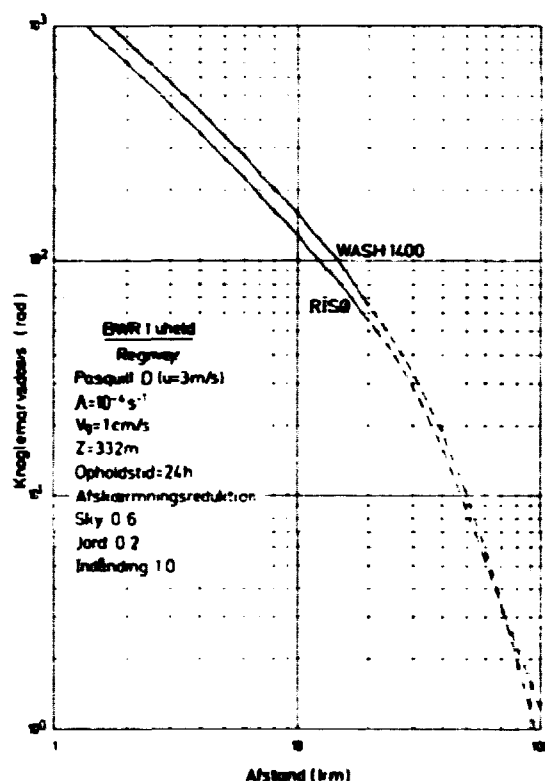


Fig 24. Knoglemarvsdosis fra BWR1 uheld

Det skal bemærkes, at Risø modellen i modsætning til WASH-1400 modellen (jvf. appendiks 1 og 2) ved beregning af den aktivitetsmængde, der deponeres på jordoverfladen, tager hensyn til, at der i det tidsrum, hvor frigørelsen varer, sker et henfald af den deponerede aktivitet, samt at datterprodukter af de deponerede isotoper opbygges og henfalder. Denne forskel, som specielt kunne gøre sig gældende for det tre timer lange BWR2 uheld, har dog ikke haft nogen væsentlig indflydelse på resultaterne af de foretagne beregninger.

## 8. SAMMENFATNING OG KONKLUSION

### 8.1. Dosisberegninger.

De doser, der ville kunne forekomme på dansk område som følge af et uheld på Barsebäckværket, er beregnet for de mest ugunstige, men dog ikke helt usandsynlige vejrforhold. Doserne er beregnet på grundlag af de frigørelser af radioaktive stoffer fra en kogendevandsreaktor, som er beskrevet i den endelige udgave af WASH-1400 for forskellige hypotetiske uheld. Individ-doser fra disse uheldsfrigørelser er beregnet på grundlag af såvel Risø's egne som Rasmussen rapportens beregningsmetoder - de sidste i form af datamaskineprogrammet RASDOS 1. De to beregningsmetoder giver overensstemmende resultater for afstande, der svarer til afstandene fra Barsebäck til dansk område. På kortere afstande må Risø modellen antages at være mest realistisk.

På omstående figurer 25, 26 og 27 er vist den arealmæssige udstrækning af de dosisfordelinger, som giver de største akutte knoglemarvsdoser i 20 kilometers afstand fra Barsebäck (BWR1 uheld jvf. figur 17). Man iagttager, at doserne aftager relativt hurtigt, når man bevæger sig bort fra fanens centerlinie på tværs af vindretningen.

De kurver, der vises på figurerne 25, 26 og 27, kan ikke ekstrapoleres ud over Øresund, fordi der ikke vil forekomme et deponeret lag på vandoverfladen på samme måde som på jordoverfladen.

### 8.2. Vurdering af de beregnede dosers betydning.

Sandsynligheden for, at knoglemarvsdoser af de størrelser, som på figurerne 9 og 15 angives i 20 kilometers afstand, medfører akutte dødsfald, må - selv under hensyntagen til usikkerheden på de beregnede doser - anses for ringe, men er i øvrigt afhængig af dels det enkelte individs almene tilstand og dels en eventuel efterfølgende medicinsk behandling. I WASH-1400 angives to forskellige sammenhænge mellem knoglemarvsdosens størrelse og sandsynligheden for akut dødsfald inden for 60 dage.

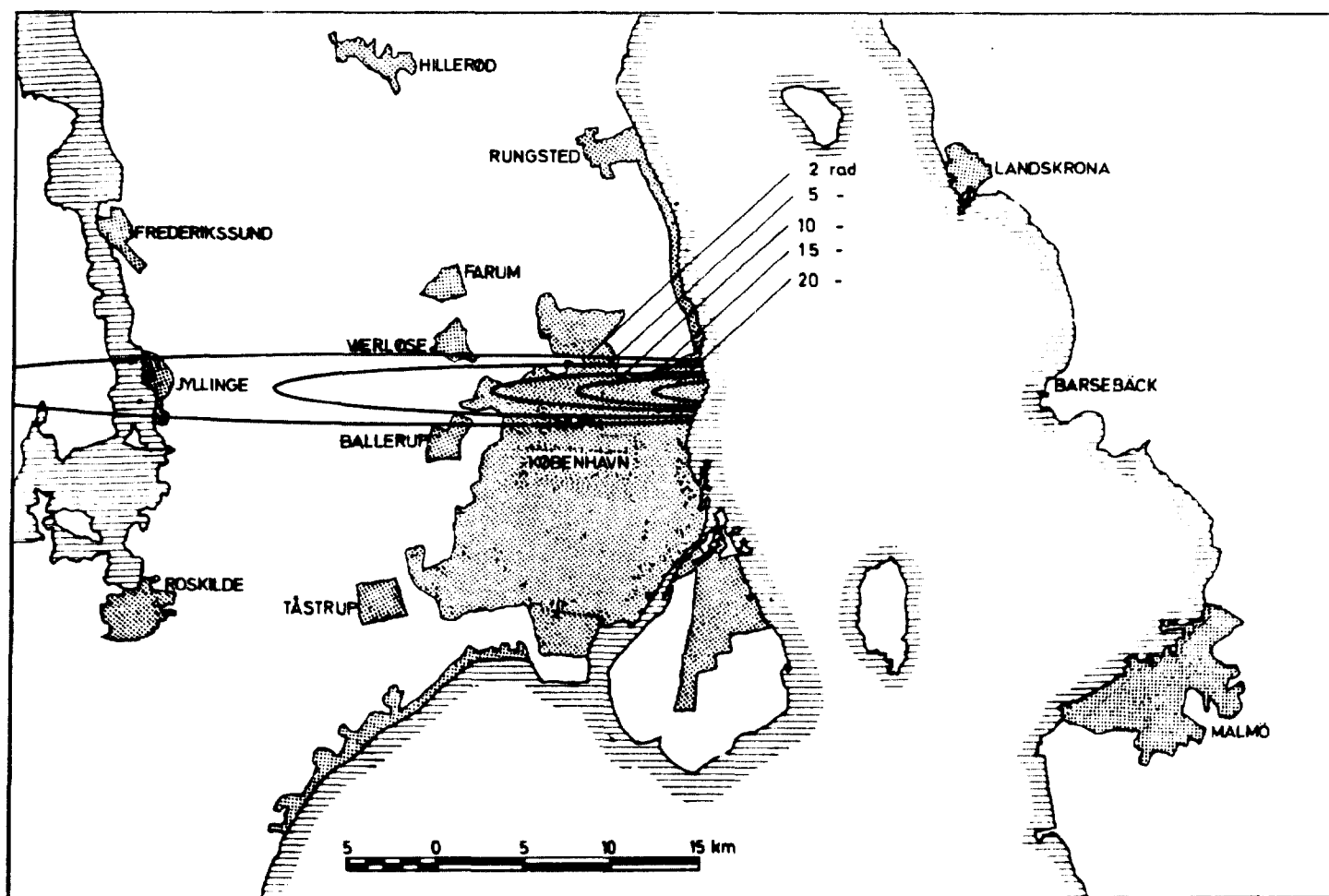


Fig. 25 Afskærmede knoglemarvsdoser fra et BWR1 uheld efter 8 timer  
De meteorologiske betingelser er Pasquill D, regnvær, vindhastighed 3 m/s



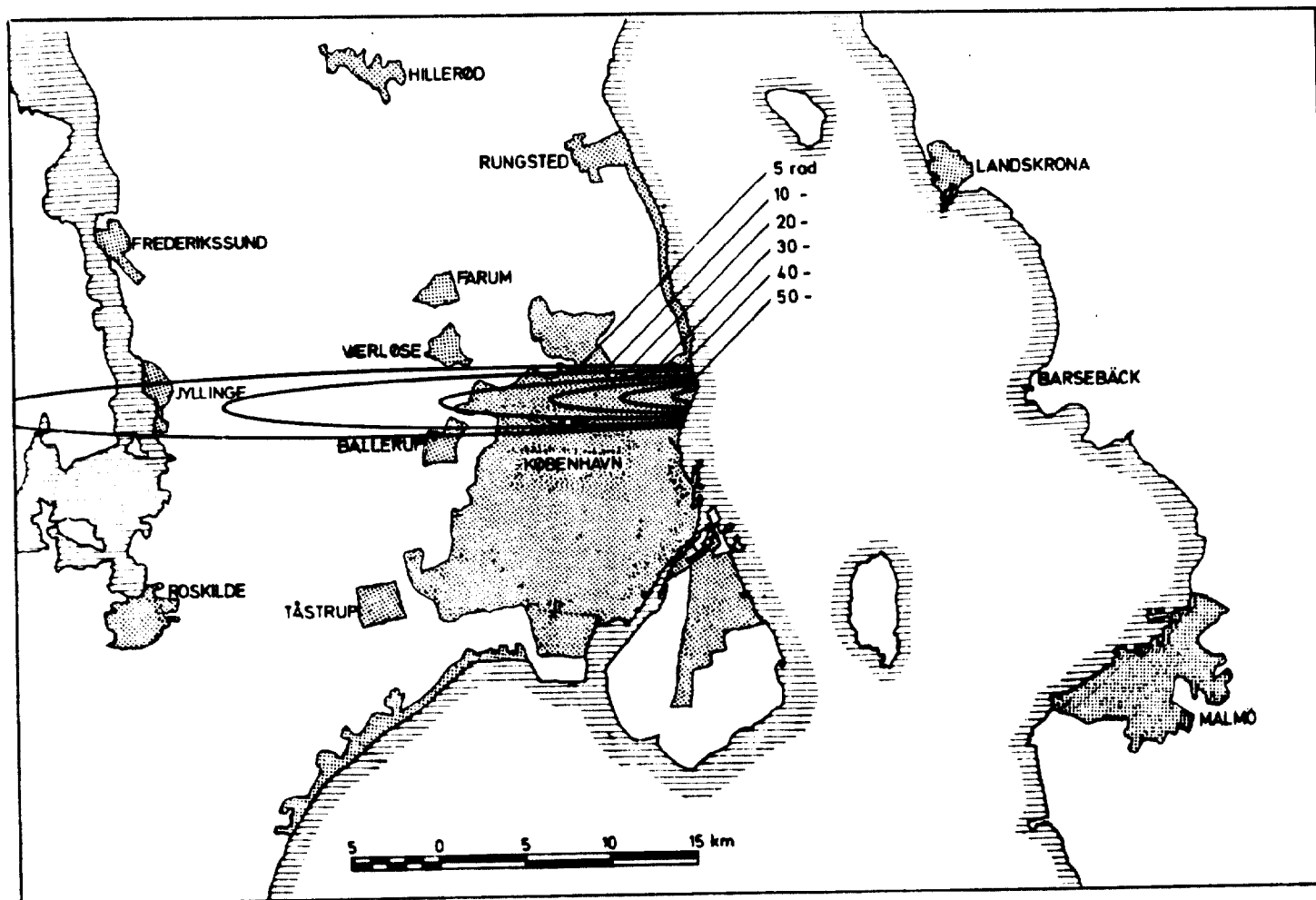


Fig. 26 Afskærmede knoglemarvsdoser fra et BWR1 uheld efter 24 timer  
De meteorologiske betingelser er Pasquill D, regnvejr, vindhastighed 3m/s

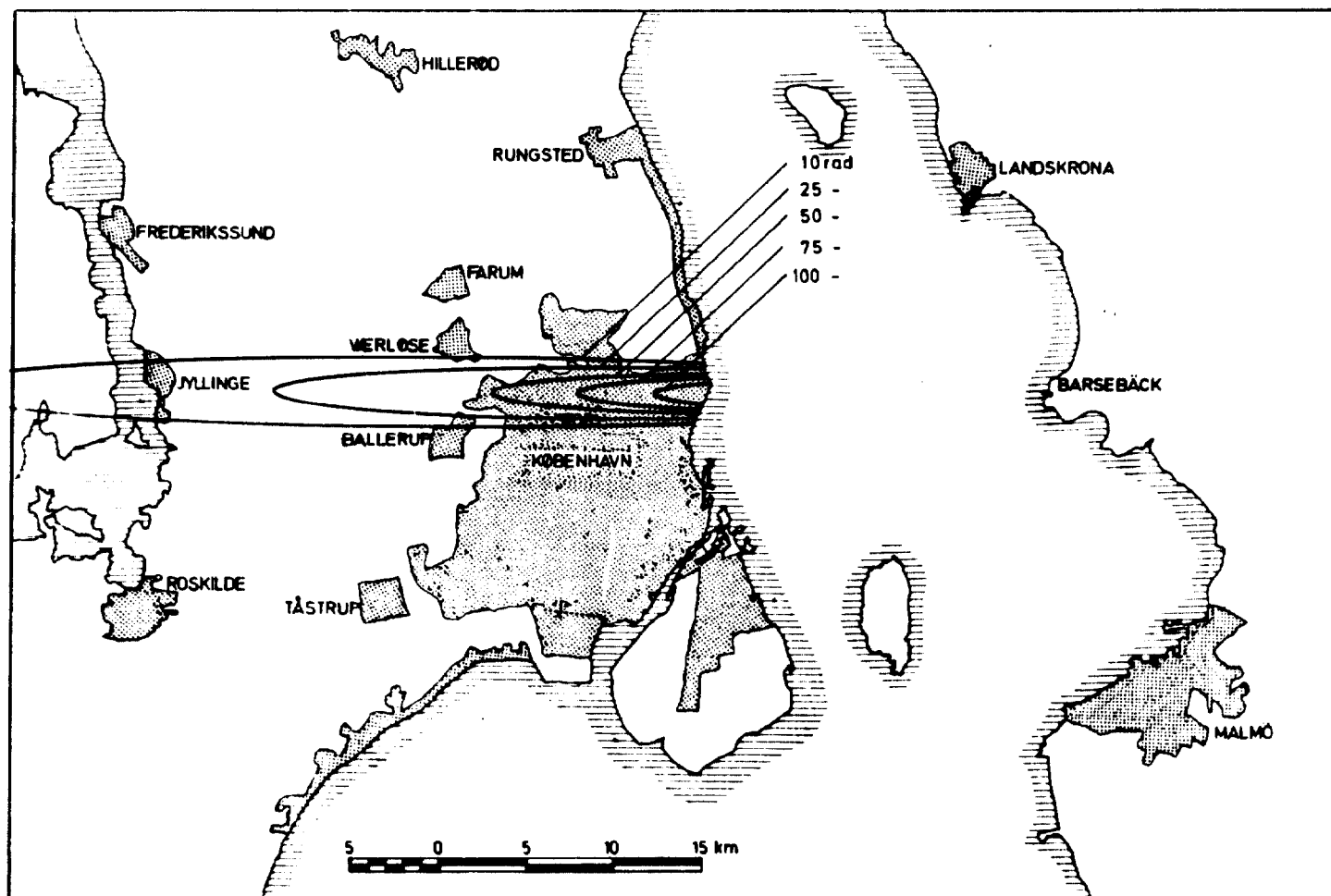


Fig. 27 Afskærmede knoglemarvsdoser fra et BWR1 uheld efter 72 timer  
De meteorologiske betingelser er Pasquill D, regnvej, vindhastighed 3m/s

Den ene gælder ved minimal medicinsk behandling efter bestrålingen og den anden ved en såkaldt understøttende behandling, som bl.a. kan omfatte blodtransfusion. Ifølge figur 15 vil den beregnede knoglemarvsdosis i 20 kilometers afstand fra et BWR1-uheld være 57 rad. En sådan dosis vil ifølge WASH-1400 selv under forudsætning af den minimale behandling kun give anledning til ca. ét dødsfald pr. 100 millioner bestrålede personer.

Sandsynligheden for akut dødsfald som følge af lunge- og mave/tarmkanaldoser vil ifølge WASH-1400 være 0, hvis doserne til disse organer er mindre end 2000 rad. For skjoldbruskkirteldoser er den tilsvarende grænse 25000 rad. For de betragtede uheldsudslip er det derfor knoglemarvsdosen, der er bestemmende for, hvor langt fra reaktoren, der kan forekomme akutte dødsfald.

Antallet af senskader i form af kræft og genetiske skader afhænger ikke alene af de akutte doser, men også af de doser, der gennem et længere tidsrum modtages fra den inhalerede aktivitet og den deponerede aktivitet på jordoverfladen. Hvad sidstnævnte angår, er det især Cs 137, som kan blive afgørende.

En vigtig konklusion af den foreliggende undersøgelse er, at knoglemarvsdoserne domineres af gammastrålingen fra det radioaktive nedfald på jordoverfladen. I henhold til WASH-1400 kan gammastrålingen fra jordoverfladen afskærmes meget effektivt. En afskærningsfaktor på 0.2 er benyttet i nærværende rapport svarende til et murstensparcelhus eller en etageejendom, men afskærningsfaktorer så lave som 0.001 kan opnås ved ophold i en kælder eller i en stor kontorbygning. Ophold indendørs reducerer også dosen fra den passerende sky, og som i WASH-1400 er der i den foreliggende rapport anvendt en afskærningsfaktor på 0.6. Der er derimod ikke anvendt nogen reduktionsfaktor for indåndingsdosen.

### 8.3. Diskussion af dosisberegningerne.

De doser, der er beregnet i denne rapport, må anses for at være større end de doser, der i virkeligheden vil forekomme under de pågældende forhold. Dette skyldes følgende forhold:

- a. Radioaktivitetsfrigørelserne er baseret på småskala eksperimenter med smelter, der har et stort overflade til volumen forhold, hvilket forøger radioaktivitetsfrigørelsen. En smeltet reaktorkerne har et meget mindre overflade til volumen forhold, som sandsynligvis vil forårsage en væsentlig mindre radioaktivitetsfrigørelse.
- b. Sammenligninger mellem Barsebäck og Peach Bottom reaktoren (som danner udgangspunktet for beregningerne i WASH-1400) viser, at det er rimeligt at antage, at kernesmeltningsuheld i Barsebäck vil give mindre relative aktivitetsudslip til atmosfæren end de tilsvarende uheld i Peach Bottom.
- c. Beregningerne i denne rapport er baseret på den antagelse, at vejr-situationen ikke ændres under uheldsforløbet. Vejrforandringer under uheldet, f.eks. i form af vindretningsændringer, vil i almindelighed have en tendens til at sprede den radioaktive sky og dermed til at reducere doserne. Dog er det muligt, at forandringer i vejr-situationen kan forårsage lokale forøgelse i dosis-niveauerne. Specielt kan intermitterende regn forårsage stærk udvaskning af radioaktivitet fra skyen i lokale områder på relativt store afstande fra reaktoren, hvilket kan resultere i høje doser fra det radioaktive nedfald på jordoverfladen. Sandsynligheden for høje doser gennem denne mekanisme er imidlertid endnu mindre end de i afsnit 6 beregnede sandsynligheder.
- d. I beregningerne af doserne fra radioaktivitet, som udvaskes fra fanen under regnvejr antages det, at hele den udvaskede aktivitet bliver liggende på jordoverfladen. Da knoglemarvsdosen domineres af strålingsbidraget fra denne aktivitet, er det derfor pessimistisk at se bort fra, at en del af aktiviteten skyldes i kloakker eller siver ned i jorden.

- e. I den anvendte metode til beregning af fanens opstigning på grund af varmeindholdet, ses der bort fra både den medfølgende damps frigørelse af varme ved kondensation og den frigjorte henfaldsvarme fra de radioaktive henfald i skyen. Dette betyder, at opstigningshøjden undervurderes, hvilket i de fleste tilfælde betyder at indviddoserne overvurderes.
- f. I beregningerne af indåndingsdoserne er der set bort fra en reduktion af disse ved indendørs ophold. Der er ikke tvivl om, at indendørs ophold, især hvis der foretages udluftning efter at fanen er passeret, kan reducere indåndingsdoserne betydeligt.

Hvis beregninger af doser fra uheldsfrigørelser skulle gøres mere realistiske, ville der især være to områder, hvor en indsats ville have betydning: 1) udviklingen af en mere realistisk atmosfærisk spredningsmodel, som kan beskrive tidsvarierende meteorologiske forhold, og 2) en forskningsmæssig indsats for at bedre forståelsen og bestemmelsen af størrelse, sammensætning og sandsynlighed for en hypotetisk aktivitetsfrigørelse.

## 9. REFERENCER.

1. S. Thykier-Nielsen. Modeller til beregning af eksterne gammadoser og inhalationsdoser fra frigørelser til atmosfæren af radioaktive stoffer. Risø-M-1725 (1974).
2. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG 75/1014).
3. Reactor Safety Study. Calculation of Reactor Accident Consequences. Appendix VI. WASH-1400.
4. F. Højerup, Fission Product Inventory in LWR's RP-4-76. Reaktorteknikafdelingen, Risø.
5. J. Elkert et. al., BEGAFIP, et program for beräkning af klyvningsprodukternes aktivitet, beta-och gammaeffekter RF-72 374 (Studsvik).
6. D. Bruce Turner, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. National Air Pollution Control Association, Cincinnati, Ohio (1969). Public Health Service Publication No. 999-AP-26.
7. D.H. Slade (Editor), Meteorology and Atomic Energy (1968). TLD-24190.
8. Niels Otto Jensen, Occurrences of Stability Classes, Wind Speeds and Wind Directions as Observed at Risø. Risø-M-1666 (1973).
9. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation. ICRP Publication 2, Pergamon Press, London (1959).
10. W.A. Lyons, Turbulent Diffusion and Pollutant Transport in Shoreline Environments. Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis. American Meteorological Society, Boston, 1975.
11. KFK-2195 (1975), Projekt Nukleare Sicherheit, 1. Halbjahresbericht 1975, side 365, fig. 4311-3.

**APPENDIKS 1**

**MODEL TIL BEREGNING AF DOSER  
FRA RADIOAKTIVT MATERIALE FRIGJORT  
TIL ATMOSFÆREN  
(WASH-1400 model)**

## 1. ATMOSFÆRISK SPREDNINGSMODEL

### 1.1. Gaussisk spredningsmodel

Frigøres materiale kontinuerligt fra et punkt, f.eks. en skorsten eller en reaktorindeslutning, vil materialet udbrede sig som en fane i vindretningen. Til beskrivelse af fanens koncentrationsfordeling anvendes i WASH 1400 den gaussiske udbredelsesmodel, i hvilken det antages, at materialekoncentrationen i vertikal retning i planet vinkelret på vindretningen er gaussisk (normal) fordelt med standardafvigelsen  $\sigma_z$ . I horizontal retning vinkelret på vindretningen antages en konstant fordeling med en horizontal udstrækning på 3 standardafvigelser ( $3 \sigma_y$ ). Standardafvigelserne eller spredningsparametrene  $\sigma_y$  og  $\sigma_z$  er begge funktioner af bl.a. afstanden fra frigørelsespunktet og atmosfærens termiske stabilitet.

Materialekoncentrationen ved jordoverfladen i en given afstand fra frigørelsespunktet er givet ved

$$\chi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{Q}{3 \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) \quad (1)$$

hvor

$\chi(x)$  er koncentrationen ved jordoverfladen i afstanden  $x$ ,  
 $\text{Ci/m}^3$

$Q$  er frigørelses hastigheden af en given isotop,  $\text{Ci/s}$

$x$  er afstanden fra frigørelsespunktet i vindretningen,  $\text{m}$

$u$  er vindhastigheden,  $\text{m/s}$

$\sigma_y(x)$  er den horizontale spredningsparameter,  $\text{m}$

$\sigma_z(x)$  er den vertikale spredningsparameter,  $\text{m}$

$z$  er afstanden mellem fanens centerlinie og jordoverfladen,  $\text{m}$

I WASH 1400 anvendes de af Martin og Tikvart angivne spredningsparametre, [2], som stort set er identiske med de spredningsparametre, som angives af Turner [4].

Er frigørelsestiden større end en halv time, antages fanen at blive bredere på grund af vindretningsfluktuationer, samtidig med at koncentrationen i fanen bliver mindre. Kaldes frigørelses-



tiden for  $\tau$  ( $\tau = 0.5$  time) kan koncentrationen beskrives ved

$$\chi(x, \tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{Q}{3 \cdot \sigma_y'(x, \tau) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) \quad (2)$$

hvor

$$\sigma_y'(x, \tau) = \sigma_y(x) \cdot \left(\frac{\tau}{0.5}\right)^{1/3} \quad (3)$$

### 1.2. Korrektion for tørdeposition

En del af den frigjorte aktivitet vil under transporten i vindretningen falde ud på jordoverfladen. Aktivitetsmængden, der pr. tidsenhed afsættes pr. arealenhed, er proportional med koncentrationen ved jordoverfladen og kan beregnes af

$$q(x, \tau) = v_g \cdot \chi'(x, \tau) \quad [\text{Ci/m}^2\text{s}] \quad (4)$$

hvor

$v_g$  er udskillelseshastigheden, m/s

$\chi'(x, \tau)$  er den for tørdeponering korrigerede luftkoncentration ved jordoverfladen,  $\text{Ci/m}^3$

Udskillelseshastigheden  $v_g$  er bl.a. en funktion af partikelstørrelse, overfladens ruhed, vindhastigheden og den termiske stabilitet. Dens numeriske værdi ligger normalt i området 0.1-10 cm/s [2]. For inaktive luftarter er udskillelseshastigheden tilnærmelsesvis lig med nul.

Beregningen af korrektionsfaktoren for tørdeponering sker på følgende måde. Hastigheden, med hvilken aktiviteten udskilles på strækningen  $dx$ , kan beskrives af

$$\frac{dQ'}{dx} = - \int_{-1.5\sigma'_y}^{1.5\sigma'_y} v_g \chi'(x, \tau) dy \quad [ \text{Ci/m s} ] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= - 3 \cdot \sigma'_y \cdot v_g \cdot \chi'(x, \tau) \\ &= - \left( \frac{2}{\pi} \cdot \frac{v_g}{u} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}\right)}{\sigma_z(x)} \right) Q' \end{aligned}$$

Med begyndelsesbetingelsen  $Q'(x=0)=Q_0$  bliver korrektionsfaktoren for tørdeponering

$$\left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_d = \exp \left( - \left( \frac{2}{\pi} \cdot \frac{v_g}{u} \cdot \int_0^x \frac{e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}}}{\sigma_z(x)} dx \right) \right) \quad (6)$$

Den korrigerede koncentration ved jordoverfladen bliver da

$$\chi'(x, \tau) = \chi(x, \tau) \cdot \left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_d \quad (7)$$

Aktivitetskoncentrationen på jordoverfladen umiddelbart efter at hele fanen har passeret bliver, idet der ses bort fra radioaktivt henfald og andre fjernelsesmekanismer på jordoverfladen under frigørelsen

$$\psi(x, \tau) = v_g \cdot \chi'(x, \tau) \cdot \tau \quad [Ci/m^2] \quad (8)$$

### 1.3. Korrektion for udvaskning under nedbør

Forekommer der nedbør under aktivitetsfrigørelsen, vil en del af aktiviteten udvaskes fra fanen, og udvaskningen sker fra alle lag af fanen, forudsat at den højde hvorfra nedbøren falder er meget større end fanens afstand over jordoverfladen.

Hastigheden, med hvilken aktiviteten udvaskes på strækningen  $dx$ , beskrives af

$$\frac{dQ}{dx} = - \Lambda \frac{Q}{u} \quad [Ci/m \cdot s] \quad (9)$$

hvor  $\Lambda$  er udvaskningskoefficienten. Denne er bl.a. en funktion af nedbørstype og -hastighed, og dens numeriske værdi ligger normalt i området  $10^{-5} - 10^{-2} s^{-1}$  [2]. For inaktive luftarter er udvaskningskoefficienten tilnærmelsesvis lig med nul.

Korrektionsfaktoren for udvaskning bliver, idet  $Q(x=0)=Q_0$

$$\left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_w = \exp(-\Lambda \frac{x}{u}) \quad (10)$$

Den korregerede aktivitetskoncentration ved jordoverfladen bliver da

$$\chi'(x, \tau) = \chi(x, \tau) \cdot \left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_w \quad (11)$$

Aktivitetsmængden som pr. tidsenhed udvaskes på jordoverfladen beregnes af

$$q(x, \tau) = \int_0^{z_1} \lambda \chi'(x, \tau) dz \quad [Ci/m^2s] \quad (12)$$

$$= \int_0^{\infty} \lambda \chi'(x, \tau) dz$$

hvor  $z_1$  er den højde, hvorfra nedbøren falder. Indsættes (11) i (12) fås

$$q(x, \tau) = \int_0^{\infty} \lambda \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot Q \cdot \exp(-\lambda \frac{x}{u})}{3 \cdot \sigma_y^2(x, \tau) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) dz \quad (13)$$

$$= \frac{\lambda \cdot Q}{3 \cdot u \cdot \sigma_y^2(x, \tau)} \exp\left(-\lambda \frac{x}{u}\right)$$

Aktivitetskoncentrationen på jordoverfladen umiddelbart efter at hele fanen har passeret bliver, idet der ses bort fra radioaktivt henfald og andre fjernelsesmekanismer (også bortskylning og nedsivning på grund af regnen) under frigørelsen

$$\psi(x, \tau) = \frac{\lambda \cdot Q \cdot \tau}{3 \cdot u \cdot \sigma_y^2(x, \tau)} \exp\left(-\lambda \frac{x}{u}\right) \quad [Ci/m^2] \quad (14)$$

#### 1.4. Korrektion for radioaktivt henfald

Efter frigørelsen af en given isotop vil denne henfalde undervejs under transporten i vindretningen. Den del af aktiviteten, som

har nået afstanden  $x$  fra frigørelsespunktet, vil være reduceret med faktoren  $\exp(-\lambda x/u)$ , hvor  $\lambda$  er isotopens henfaldskonstant (1/s). Korrektionsfraktoren for radioaktivt henfald bliver

$$\left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_r = \exp(-\lambda \frac{x}{u}) \quad (15)$$

Er datterproduktet fra henfaldet af den betragtede isotop også radioaktivt, vil der gradvis opbygges en aktivitet undervejs, som vil give anledning til strålingsdoser. Datterproduktaktivitetens opbygning kan beskrives ved

$$Q_d(x) = Q \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_m} \cdot (e^{-\lambda_m \frac{x}{u}} - e^{-\lambda_d \frac{x}{u}}) \quad (16)$$

hvor

$Q$  er frigørelses hastigheden af den betragtede isotop, Ci/s

$Q_d(x)$  er datterproduktaktiviteten i afstanden  $x$ , Ci/s

$\lambda_m$  er henfaldskonstanten for den frigjorte isotop, 1/s

$\lambda_d$  er henfaldskonstanten for datterisotopen, 1/s

### 1.5. Termisk løft af den frigjorte aktivitet

Ved en aktivitetsfrigørelse i forbindelse med et kernenedsmeltningssuheld vil der sandsynligvis også frigøres betragtelige mængder vanddamp med en temperatur på omkring  $100^\circ\text{C}$ , således at fanen kan indeholde en betragtelig varmeenergi. Fanen vil derfor stige til vejrs og nå en højde som bestemmes af varmeindholdet i fanen, atmosfærens stabilitet, vindhastigheden og frigørelses højden. Afstanden mellem fanens centerlinie  $Z$  og jordoverfladen beregnes på grundlag af Briggs' formel, og der ses bort fra fordampnings- og henfaldsvarmens indflydelse på opstigningen [2].

I tilfælde med ustabil eller neutral atmosfære bestemmes  $Z$  af

$$z = h + (36 \cdot P)^{1/3} \cdot u^{-1} \cdot x^{2/3} \quad (17)$$

hvor

- h er frigørelsesshøjden, m  
P er frigørelseshastigheden af fanens varmeindhold (minus fordampningsvarmen), MW

Opstigningen forudsættes at standse på en afstand fra frigørelsespunktet, som er numerisk lig med  $177 \cdot P^{2/5}$ . Indsættes denne værdi i (17) fås fanens endelige højde som

$$z = h + 104 \cdot P^{3/5} \cdot u^{-1} \quad (18)$$

I tilfælde med stabil atmosfære bestemmes z af

$$z = h + \left( \frac{215 \cdot P}{u \cdot s} \right)^{1/3} \quad (19)$$

hvor stabilitetsparameteren s er givet ved

$$s = \frac{g}{T} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad [1/s^2]$$

$\partial \theta / \partial z$  er her potential temperaturgradienten for atmosfæren, g er tyngdeaccelerationen og T atmosfærens temperatur [ $^{\circ}K$ ].

### 1.6. Korrigeret luftkoncentration

Den korrigerede koncentration ved jordoverfladen af en given isotop, som frigøres med hastigheden  $Q$  (Ci/s), bliver på grundlag af de ovenstående betragtninger

$$\chi'(x, \tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{Q}{3 \cdot \sigma_y'(x, \tau) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \cdot \exp\left(-\left(\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{v_g}{u} \cdot \int_0^x \frac{e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}}}{\sigma_z(x)} dx + \Lambda \frac{x}{u} + \lambda_m \frac{x}{u}\right)\right) \quad (20)$$

Koncentrationen ved jordoverfladen af et givet datterprodukt, som opbygges undervejs bliver, idet det forudsættes, at moderproduktet også er deponerbart

$$\chi'(x, \tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{Q}{3 \cdot \sigma_y'(x, \tau) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \cdot \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_m} \cdot \left(e^{-\lambda_m \frac{x}{u}} - e^{-\lambda_d \frac{x}{u}}\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{v_g}{u} \cdot \int_0^x \frac{e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}}}{\sigma_z(x)} dx + \Lambda \frac{x}{u}\right)\right) \quad (21)$$

I tilfælde med tørvejr sættes  $\Lambda=0$  i ligningerne (20) og (21).

## 2. DOSISMODELLER

### 2.1. Indåndingsdosis

En person, som opholder sig i afstanden  $x$  fra frigørelsespunktet, hvor isotopkoncentrationen er  $\chi'(x, \tau)$ , vil indånde aktivitet med hastigheden  $2.66 \cdot 10^{-4} \cdot \chi'(x, \tau)$  (Ci/s), idet der anvendes en indåndingshastighed på  $2.66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  [2]. Hvis personen opholder sig på stedet under hele skyens passage, bliver den

samlede inhalerede aktivitet af den betragtede isotop lig med  $2.66 \cdot 10^{-4} \cdot \chi'(x, \tau) \cdot \tau$  (Ci).

Efter indtaget vil isotopen fordele sig i kroppens organer afhængig af hvilket stof det drejer sig om, og hvilken kemisk form dette er på. Isotopen vil derfor afsætte en del af sin strålingsenergi i disse organer (lunger, skjoldbruskkirtel, knoglemarv etc.). Efterhånden som isotopen henfalder til en stabil isotop (eventuelt over et eller flere radioaktive datterprodukter) og udskilles biologisk fra kroppen, aftager dosishastigheden i det betragtede organ. Den integrerede dosis over tiden T fra den inhalerede isotop bliver

$$D_{in}(x, \tau, T) = 2.66 \cdot 10^{-4} \cdot DF_{in}(T) \cdot \chi'(x, \tau) \cdot \tau \quad [\text{rad}] \quad (22)$$

hvor  $DF_{in}(T)$  er dosen til et givet organ pr. inhaleret aktivitetsmængde (rad/Ci) integreret over T. Består frigørelsen af N isotoper, fås den totale indåndingsdosis til det betragtede organ ved ophold på stedet x under hele skyens passage som

$$D_{in}(x, \tau, T) = 2.66 \cdot 10^{-4} \cdot \tau \cdot \sum_{i=1}^N DF_{in_i}(T) \cdot \chi'_i(x, \tau) \quad (23)$$

Dosisomsætningsfaktorerne  $DF_{in}(T)$  er angivet i WASH 1400, appendiks VI, side D-8 til side D-12.

Ved ophold indendørs anvendes ingen reduktionsfaktor.

## 2.2. Ekstern gammadosis fra skypassage

Under aktivitetsfanens passage er dosishastigheden i en given afstand x hidrørende fra gammastrålingen fra fanen konstant. Gammadosishastigheden i denne afstand stammer fra den aktivitet i fanen, som befinder sig inden for en afstand af nogle hundrede meter fra opholdsstedet, hvilket skyldes gammastrålingens relativt lange rækkevidde i luft. Dosishastigheden kan derfor beregnes som summen



af alle dosishastighedsbidragene fra fanens enkelte dele, idet der tages hensyn til dæmpning og build-up i luftlaget mellem hvert delelement og opholdsstedet. Da denne fremgangsmåde kræver en rumlig integration af koncentrationsfordelingen over fanens volumen for hver af isotopernes fotonenergier er der foretaget den tilnærmelse, at dosishastigheden først beregnes i fanens centerlinie, som om fanens udstrækning var uendelig og med den samme koncentration som i centerlinien, hvorefter dosishastigheden korrigeres for fanens endelige udstrækning og højde over jordoverfladen. Den anvendte korrektionsfaktor er derfor en funktion af både spredningsparameteren  $\sigma_z$  og fanens afstand  $Z$  over jordoverfladen, og den er tabelleret i WASH 1400, appendiks VI, side 8-4 for forskellige værdier af  $Z/\sigma_z$  og  $\sigma_z$ . Korrektionsfaktorer for værdier af  $\sigma_z$  og  $Z/\sigma_z$  som ikke er angivet i tabellen findes ved logaritmisk interpolation.

Gammadosis til et givet organ fra en frigjort isotop beregnes af

$$D_{\text{sky}}(x, \tau) = CF(\sigma_z(x), Z/\sigma_z(x)) \cdot DF_{\text{sky}} \cdot \tau \cdot \chi'(x, \tau) \cdot e^{-\frac{Z^2}{2\sigma_z(x)^2}} \quad [\text{rad}] \quad (24)$$

hvor

$DF_{\text{sky}}$  er gammadosis til et givet organ pr. tidsintegreret koncentrationsenhed af den betragtede isotop,  $\text{rad/Cis/m}^3$

$CF(\sigma_z(x), Z/\sigma_z(x))$  er korrektionsfaktoren, som korrigerer centerliniedosishastigheden i en uendelig sky til dosishastigheden ved jordoverfladen fra en sky af endelig udstrækning.

Dosisomsætningsfaktoren  $DF_{\text{sky}}$  er angivet i appendiks VI, tabel C-1, side C-5.

Består frigørelsen af  $N$  isotoper, fås den totale gammadosis fra et ophold i afstanden  $x$  under hele fanens passage som

$$D_{\text{sky}}(x, \tau) = CF(\sigma_z(x), z/\sigma_z(x)) \cdot \tau \cdot e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}} \cdot \sum_{i=1}^N DF_{\text{sky}_i} \cdot \chi_i'(x, \tau) \quad (25)$$

Ved ophold indendørs anvendes en afskærmningsfaktor, som korrigerer for at en del af fotonenergien vil absorberes i bygningsmaterialet. I WASH 1400, appendiks VI, tabel 11-7, side 11-22 angives afskærmningsfaktorer for forskellige bygningstyper.

### 2.3. Ekstern gammadosis fra deponeret aktivitet

Under den frigjorte aktivitets transport i vindretningen vil en del af denne udskilles fra fanens nederste lag og afsættes på jordoverfladen. Under nedbør vil der tillige kunne udvaskes aktivitet fra hele fanens højde. Når aktiviteten er afsat på jordoverfladen, vil den udsendte gammastråling kunne give anledning til en strålingsdosis i den tid en person opholder sig på stedet. Dosishastigheden vil efterhånden aftage, når de enkelte isotoper henfalder til stabile isotoper og fjernes på grund af nedsivning og bortskylning.

Aktivitetskoncentrationen af en given isotop umiddelbart efter skyens passage i afstanden  $x$  er givet ved, jvf. afsnit 1.2 og 1.3 (der ses bort fra henfald på jordoverfladen under frigørelsen)

tørvej:  $\psi(x, \tau) = v_g \cdot \tau \cdot \chi'(x, \tau)$

nedbør: 
$$\psi(x, \tau) = v_g \cdot \tau \cdot \chi'(x, \tau) + \frac{\Lambda \cdot Q \cdot \tau}{3 \cdot \sigma_y^2(x, \tau) \cdot u} \cdot \left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_w \cdot \left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_d \cdot \left( \frac{Q(x)}{Q_0} \right)_r$$

Ved beregning af dosishastigheden antages, at denne overfladekoncentration findes uendeligt langt ud til alle sider omkring det betragtede punkt. Angiver faktoren  $DR_0$  dosishastigheden fra en given isotop til et givet organ en meter over en uendelig plan

fladekilde på  $1 \text{ Ci/m}^2$ , fås dosishastigheden fra denne isotop i afstanden  $x$  fra frigørelsespunktet umiddelbart efter fanens passage som

$$D'_0(x, \tau) = 0.7 \cdot DR_0 \cdot \psi(x, \tau) \quad [\text{rad/h}] \quad (26)$$

Faktoren 0.7 tager hensyn til at strålingen dæmpes på grund af jordoverfladens ruhed. Dosishastigheden vil efterhånden aftage i takt med, at isotopen fjernes ved henfald og andre mekanismer. Dosishastighedsbidrag fra eventuelle datterprodukter som dannes ved henfaldet medtages i den samlede dosis. Dosishastighedens tidsvariation kan derfor principielt beskrives af

$$D'_{\text{jord}}(x, \tau, t) = 0.7 \cdot \psi(x, \tau) \cdot DR'(t) \quad (27)$$

hvor  $DR'(t)$  nu indeholder både tidsfunktionen for eventuelle datterprodukters dosishastighedsbidrag samt tidsfunktionen for aktivitetens afklingning både med hensyn til radioaktivt henfald og andre mekanismer, f.eks. nedsivning og bortskylning med regnvand.

Den integrerede dosis over tiden  $T$  fra den betragtede isotop beregnes af

$$D_{\text{jord}}(x, \tau, T) = 0.7 \cdot \psi(x, \tau) \cdot \int_0^T DR'(t) dt \quad [\text{rad}] \quad (28)$$

$$= 0.7 \cdot \psi(x, \tau) \cdot DF_{\text{jord}}(T)$$

Dosisomsætningsfaktoren  $DF_{j\text{ord}}(T)$  er angivet i WASH 1400, appendiks VI, tabel C-2 side C-6 for  $T = 1$  dag og  $T = 7$  dage.

Den totale dosis fra en frigørelse af  $N$  isotoper beregnes af

$$D_{j\text{ord}}(x, \tau, T) = 0.7 \cdot \sum_{i=1}^N \psi_i(x, \tau) \cdot DF_{j\text{ord}_i}(T) \quad (29)$$

Ved ophold indendørs anvendes en afskærmningsfaktor, som er afhængig af bygningstypen. I appendiks VI, tabel 11-9, side 11-25 angives afskærmningsfaktorer for forskellige bygningstyper.

### 3. TESTBEREGNINGER MED WASH-1400 MODELLEN

På grundlag af det udarbejdede computerprogram RASDOS 1 er der udført en række testberegninger af knoglemarvsdoser, lungedoser, mave- tarmkanaldoser og skjoldbruskkirteldoser som funktion af afstanden fra frigørelsesstedet. Som sammenligningsgrundlag er anvendt figur VI 13-6 i appendiks VI, WASH-1400.

Figur VI 13-6 viser doserne som funktion af afstanden fra reaktoren i vindretningen fra et stort koldt udslip fra en 3200 MWt BWR i en stabil vejrsituation (Pasquill F, vindhastighed 2 m/s). Frigørelsesprocenterne for de enkelte isotoper ved dette uheld er indhentet hos forfatterne til WASH-1400. Frigørelses- og køletiden er henholdsvis 3 timer og 3.5 timer, og frigørelsen antages at ske ved jordoverfladen. Iøvrigt antages konstante meteorologiske forhold under frigørelsen. Doserne vist på figur VI 13-6 er angivet uden afskærmningsfaktor for indendørs ophold, men der er anvendt en reduktionsfaktor på 0.7 for den eksterne gammadosis fra deponeret aktivitet på grund af jordoverfladens ruhed.

Med de ovennævnte frigørelsesbetingelser og de samme tidsintegrationsintervaller som angivet på figur VI 13-6 er doserne fra dette uheld beregnet, og de beregnede organdoser er vist på figurerne I-1 til I-4. Den iagttagne overensstemmelse må anses for tilfredsstillende.

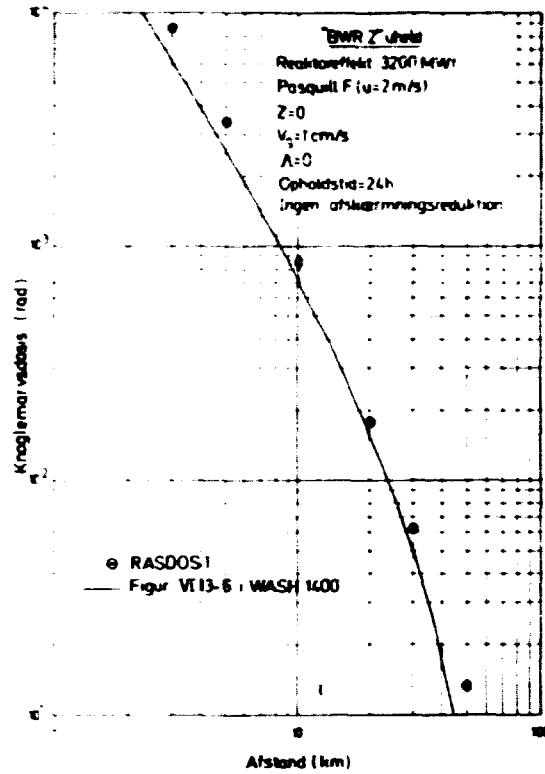


Fig 1-1 Knoglemarvadosis fra "BWR 2" uheld

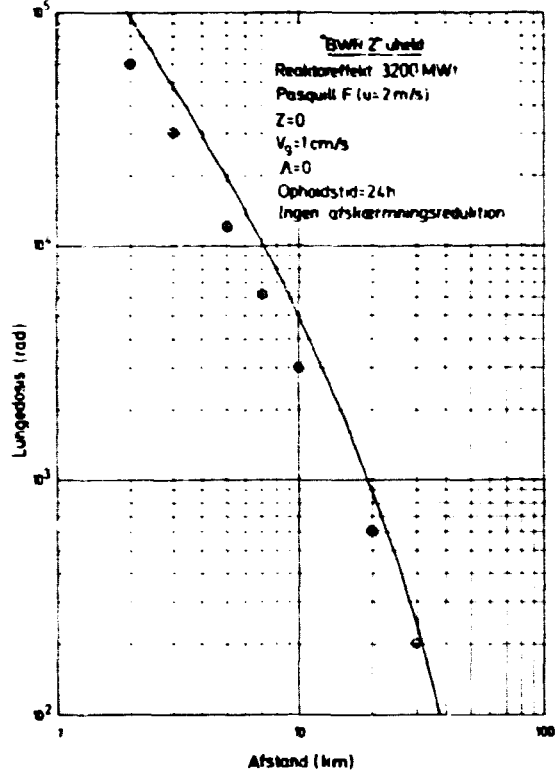


Fig 1-2 Lungedosis fra "BWR 2" uheld

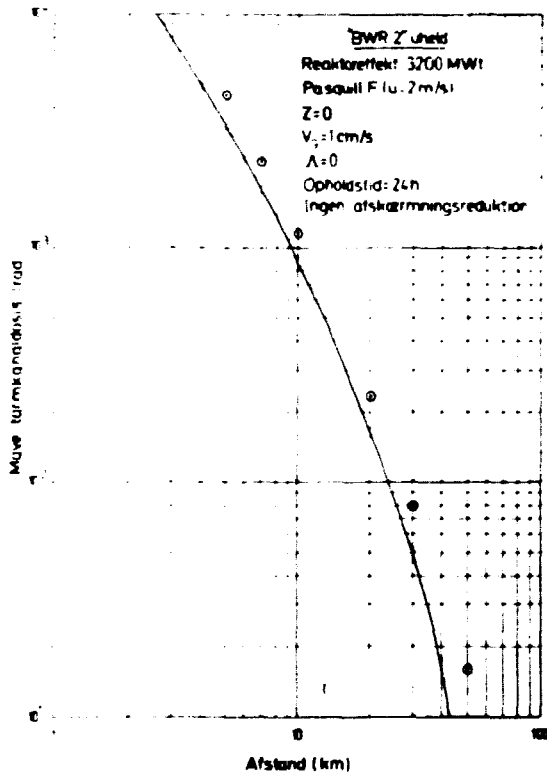


Fig 1-3 Mave-tarmkanaldosis fra "BWR 2" uheld

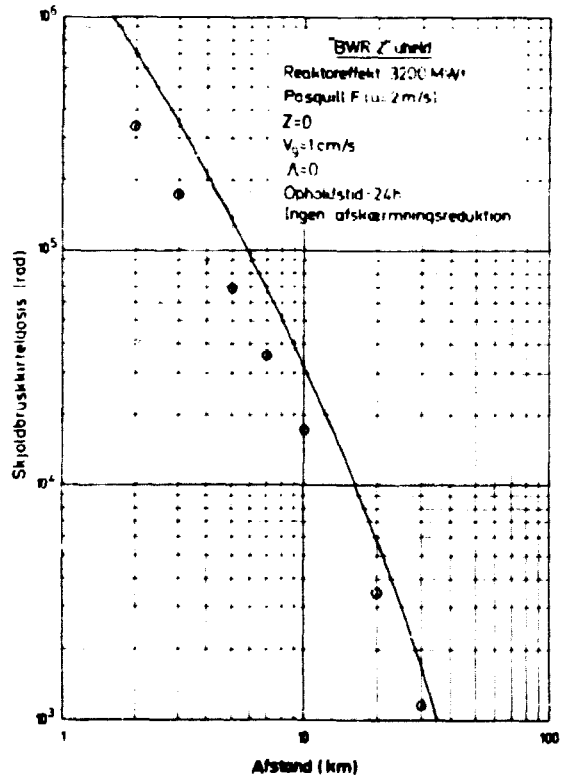


Fig 1-4 Skjoldbruskkirteldosis fra "BWR 2" uheld

### 3. REFERENCER

1. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG 75/014). USNRC (1975).
2. Reactor Safety Study. Calculation of Accident Consequences. Appendix VI. WASH-1400.
3. S. Thykier-Nielsen, Modeller til beregning af eksterne gam-madoser og inhalationsdoser fra frigørelser til atmosfæren af radioaktive stoffer. Risø-M-1725 (1974).
4. D. Bruce Turner, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. National Air Pollution Control Association, Cincinnati, Ohio (1969). Public Health Service Publication No. 999-AP-26.

## APPENDIKS 2

### MODEL TIL BEREGNING AF DOSER FRA RADIOAKTIVT MATERIALE FRIGJORT TIL ATMOSFÆREN (Risø model)

## 1. UDBREDELSESMODEL

### 1.1. Generel beskrivelse

Som grundlag benyttes den gaussiske udbredelsesmodel [1, 2 og 4]. Ifølge denne model antages en gaussisk fordeling af materialekoncentrationen i planet vinkelret på vindretningen. Antages det tillige, at jordoverfladen er totalreflekterende, bliver udbredelsesformlen i et retvinklet koordinatsystem med begyndelsespunkt i kildepunktet (frigørelsespunktet) og x-aksen i vindretningen:

$$(1) \quad X(x, y, z, s, u) = Q(x, t) \cdot Sg(x, y, z, s, u)$$

idet

$$(2) \quad Sg(x, y, z, s, u) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_y(x, s) \cdot \sigma_z(x, s)} \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x, s)^2}} \cdot \left[ e^{-\frac{z^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}} + e^{-\frac{(z+2 \cdot H)^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}} \right]$$

hvor

$X(x, y, z, s, u)$	= koncentration [Ci/m <sup>3</sup> ]
$Sg(x, y, z, s, u)$	= relativ koncentration [sek/m <sup>3</sup> ]
$(x, y, z)$	= detektorpunktets koordinater [m]
$s$	= kategori for atmosfærisk stabilitet
$u$	= vindhastighed [m/sek]
$\sigma_y(x, s)$	= horisontal udbredelsesparameter [m]
$\sigma_z(x, s)$	= vertikal udbredelsesparameter [m]
$Q(x, t)$	= tilsyneladende kildestyrke [Ci/sek] til tiden $t$
$H$	= effektiv udbredelseshøjde [m]

Formlen (2) forudsætter, at diffusion i udbredelsesretningen (x-retningen) kan negligeres. Denne forudsætning gælder, når



frigørelsen strækker sig over et tidsrum, der er lig med eller større end transporttiden ( $\frac{x}{u}$ ) fra kilden til det betragtede detektorpunkt [2 og 4].

Formel (2) kan ikke anvendes i de tilfælde, hvor udbredelsesforholdene påvirkes mærkbart af et blandingslag, som opadtil afgrænser det luftlag, hvori det frigjorte materiale tænkes at udbrede sig, og hvori der forekommer turbulent spredning. Eksistensen af et sådant blandingslag vil medføre, at den vertikale materialefordeling med stigende afstand fra kildepunktet ændres fra gaussisk til homogen. Idet blandingslaget antages at være totalreflekterende, kan den relative koncentrationsfordeling ifølge Turner [6] beregnes som følger:

Materialefordelingen under blandingslaget påvirkes først fra afstanden  $x_L$ , hvor koncentrationen ved blandingslagets nedre grænse er lig  $\frac{1}{10}$  af koncentrationen i fanens centerlinie. Fra afstanden  $x_L$  sker der en gradvis overgang mellem gaussisk og homogen fordeling i det vertikale plan. Materialefordelingen kan for  $x_L < x$  beregnes ved at "folde" den reelle kilde med hensyn til såvel jordoverfladen som blandingslagets nedre afgrænsning. Der er med andre ord tale om superposition af et antal imaginære kilder (i princippet uendelig mange), som er identiske med den reelle, men beliggende i forskellig afstand under jordoverfladen henholdsvis over blandingslagets nedre afgrænsning.

Fra en bestemt afstand  $x_C$  ( $x_L < x_C$ ) kan den vertikale materialefordeling med god tilnærmelse betragtes som homogen.

$x_L$  beregnes af relationen:

$$\sigma_z(x_L) = \frac{L-H}{\sqrt{2 \cdot \ln(10)}} = 0.466 \cdot (L-H) \quad [\text{meter}]$$

hvor

$L$  = blandingshøjden (højden af det luftlag, hvori det frigjorte materiale udbreder sig) [meter]

$H$  = effektiv udbredelseshøjde [meter]

$x_C$  beregnes af:

$$\sigma_z(x_C) = \sigma_{zL} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot L = 0.798 \cdot L$$

Man har da følgende udtryk for den relative koncentration:

a.  $0 < x < x_L$

$$(2) \quad Sg(x, y, z, s, u) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x, s)^2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x, s) \cdot \sigma_z(x, s) \cdot u} \cdot \left[ \exp\left(-\frac{z^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2 \cdot H)^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) \right]$$

b.  $x_L \leq x \leq x_C$

$$(3) \quad Sg_{B1}(x, y, z, s, u) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x, s)^2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x, s) \cdot \sigma_z(x, s) \cdot u} \cdot \left[ \exp\left(-\frac{z^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2 \cdot H)^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) + \sum_{i=1}^4 \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot i \cdot L - 2 \cdot H - z}{\sigma_z(x, s)}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot i \cdot L - z}{\sigma_z(x, s)}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot i \cdot L + z}{\sigma_z(x, s)}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot i \cdot L + 2 \cdot H + z}{\sigma_z(x, s)}\right)^2\right) \right] \right]$$

c.  $x_C \leq x$

$$(4) \quad Sg_{B2}(x, y, z, s, u) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x, s)^2}\right)}{\pi \cdot \sigma_y(x, s) \cdot \sigma_{zL} \cdot u}$$

De under b. og c. givne formler gælder kun for  $-H \leq z < H$ .

## 1.2. Middelkoncentrationer

Middelkoncentrationen,  $Sgm(x, z, s, u, \alpha)$ , for en (smal) sektor er i en given afstand,  $x$ , fra frigørelsespunktet [4]:

$$(5) \quad Sgm(x, z, s, u, \alpha) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sigma_y(x, s)}{2 \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{2} \cdot \sigma_y(x, s)}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{2} \cdot \sigma_y(x, s)}\right) \right] \cdot Sg(x, 0, z, s, u)$$

hvor

$$\operatorname{erf}(t) = \int_0^t \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-v^2} dv, \text{ fejlfunktionen}$$

$\alpha$  = den halve sektorvinkel for den betragtede sektor

$2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha$  = sektorbredde

Formlen (5) kan med god tilnærmelse bruges for sektorer med en vinkel på  $30^\circ$  eller mindre.

En anden, og set fra en meteorologisk synsvinkel, principielt forskellig måde at beregne middelkoncentrationen i en given sektor på, er at benytte den tværvindsintegrerede koncentration:

$$\begin{aligned} Sg_t(x, z, s, u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} Sg(x, y, z, s, u) dy \\ &= \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y(x, s) \cdot Sg(x, 0, z, s, u) \end{aligned}$$

Middelkoncentrationen,  $Sgm_t(x, z, s, u, \alpha)$ , i en given afstand,  $x$ , bliver da for en sektor af bredden  $2 \cdot \alpha$  grader:

$$\begin{aligned} (6) \quad Sgm_t(x, z, s, u, \alpha) &= \frac{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_y(x, s)}{\frac{\alpha}{180} \cdot 2 \cdot \pi \cdot x} \cdot Sg(x, 0, z, s, u) \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{90 \cdot \sigma_y(x, s)}{\alpha \cdot x} \cdot Sg(x, 0, z, s, u) \end{aligned}$$

Det kan vises, at

$$Sgm(x, z, s, u, \alpha) < Sgm_t(x, z, s, u, \alpha) \text{ for alle } \alpha > 0$$

Forskellen mellem  $Sgm$  og  $Sgm_t$  vil for givne  $x$ -værdier være mindre, jo mindre  $\sigma_y$  er i forhold til den halve sektorbredde,

d.v.s.

$$\frac{\sigma_y(x,s)}{x \cdot \tan \alpha} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{S_{gm}(x,z,s,u,\alpha)}{S_{gm_t}(x,z,s,u,\alpha)} \rightarrow 1$$

### 1.3. Effektiv udbredelseshøjde

Den højde, i hvilken udbredelsen af det frigjorte materiale begynder (den effektive udbredelseshøjde) er, når udslipspunktet er frit beliggende, sædvanligvis større end udslipspunktets reelle højde over jorden. Forskellen skyldes i hovedsagen turbulens omkring udstrømningsstedet samt det udstrømmende materiales hastighed i opadgående retning. Endvidere er det udstrømmende materiales temperatur af betydning, idet fanen (eller skyen) vil stige til en højde, der afhænger dels af forholdet mellem skyens varmeafgivelse og den varme, den modtager fra den omgivende luft dels af den atmosfæriske stabilitet og vindhastigheden. Indeholder fanen (eller skyen) radioaktivt materiale, vil der til stadighed produceres varme i denne. Denne "selvopvarmning" kan i visse tilfælde blive så stor, at fanen bliver ved med at stige i et meget langt tidsrum, hvorefter følger, at den effektive udbredelseshøjde vokser samtidig med, at fanen (skyen) bevæger sig i vindens retning. I de her nævnte udbredelsesformler må den effektive udbredelseshøjde  $H$  (en konstant), da erstattes med funktionen  $H(x)$ , der er en funktion af afstanden i vindretningen,  $x$ . Problemet er nærmere belyst i [12] og [3].

### 1.4. Den tilsyneladende kildestyrke

Den tilsyneladende kildestyrke,  $Q(x,t)$ , er lig frigørelses-hastigheden korrigeret for ændringer på strækningen mellem kildepunkt og detektorpunkt (som følge af udfald, radioaktivt henfald, etc.).

Frigøres en radioaktiv isotop med konstant hastighed,  $c$  [Ci/sek], bliver den tilsyneladende kildestyrke:

$$(7) \quad Q(x,t) = c \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{x}{u}} \text{ [Ci/sek] for } t_{f1} + \frac{x}{u} \leq t \leq t_{f2} + \frac{x}{u}$$

$$= 0 \quad \text{for } t < t_{f1} + \frac{x}{u} \vee t_{f2} + \frac{x}{u} < t$$

hvor

$tf_1$  = tidspunkt for frigørelsens start

$tf_2$  = tidspunkt for frigørelsens slutning

$\lambda$  = henfaldskonstant

Henfaldet af de frigivne isotoper under transporten i vindretningen bort fra frigørelsesstedet medfører dannelsen af datterprodukter. Betragtes den situation, hvor en isotop, moderproduktet, og dets radioaktive datterprodukt begge frigøres fra kilden med de konstante hastigheder  $\epsilon_p$  [Ci/sek] henholdsvis  $\epsilon_d$  [Ci/sek], bliver de tilsyneladende kildestyrker

for moderproduktet

$$Q_p(x, t) = \epsilon_p \cdot e^{-\lambda_p \frac{x}{u}} \text{ [Ci/sek]}$$

for datterproduktet

$$Q_d(x, t) = \epsilon_d \cdot e^{-\lambda_d \frac{x}{u}} + \frac{\epsilon_p \cdot \lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p} \cdot \left( e^{-\lambda_p \frac{x}{u}} - e^{-\lambda_d \frac{x}{u}} \right) \text{ [Ci/sek]}$$

hvor

$\lambda_p$  = henfaldskonstant for moderprodukt [sek<sup>-1</sup>]

$\lambda_d$  = henfaldskonstant for datterprodukt [sek<sup>-1</sup>]

Bemærk, at  $\epsilon_d$  eventuelt kan være lig 0 (d.v.s. ingen separat frigørelse af datterproduktet).

Ved beregning af doser benyttes begrebet tidsintegreret kildeled:

$$I(x, te_1, te_2) = \int_{te_1}^{te_2} Q(x, t) dt$$

For en frigørelse med konstant hastighed, således som beskrevet ovenfor fås:

$$(8) \quad I(x, te_1, te_2) =$$

$$(\min (te_1, tf_2 + \frac{x}{u}) - \max (te_1, tf_1 + \frac{x}{u})) \cdot Q(x, t)$$

$$\text{for } te_1 \leq tf_2 + \frac{x}{u} \text{ \& } tf_1 + \frac{x}{u} \leq te_2, \text{ og}$$

$$= 0 \text{ for } tf_2 + \frac{x}{u} < te_1 \vee te_2 < tf_1 + \frac{x}{u}$$

### 1.5. Deponering

#### 1.5.1. Deponering generelt

En del af det materiale, der befinder sig i fanen, kan under transporten i vindretningen falde ud på jorden. Deponeringsmekanismernes er ret komplicerede, og her skal derfor kun angives de til den gaussiske model knyttede metoder for beregning af tørdeponering og udvaskning (wash-out). Iøvrigt henvises til [6, 7 og 1].

Ved betragtning af tørdeponering benyttes den såkaldte udskillelseshastighed (velocity of deposition),  $v_g$ , der er defineret som:

$$v_g = \frac{\text{ændring i overfladekoncentration pr. sek.}}{\text{materialekoncentration ved jordoverfladen}}$$

Mængden af materiale, der pr. tidsenhed afsættes pr. arealenhed af jordoverfladen, beregnes som:

$$(g) \quad w_D(x, y, s, u) = v_g \cdot x'(x, y, -H, s, u) \quad [Ci/m^2/sek]$$

hvor

$$v_g = \text{udskillelseshastigheden [m/sek]}$$

$$x'(x, y, -H, s, u) = Q_D(x, t, s) \cdot S_g(x, y, -H, s, u)$$

$$= \text{materialekoncentrationen ved jordoverfladen}$$

$$[Ci/m^3] \text{ korrigeret for udfald (deponering)}$$

$$Q_D(x, t, s) = \text{tilsyneladende kildestyrke korrigeret for}$$

$$\text{udfald [Ci/sek]}$$

Idet udfaldet antages at finde sted på hele strækningen fra kildepunkt til detektorpunkt, beregnes  $Q_D(x,t,s)$  som:

$$(10) \quad Q_D(x,t,s) = Q_0 \cdot \exp \left[ -\lambda \cdot \frac{x}{u} - \int_0^x \frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right\}}{\sigma_z(x,s)} dx \right]$$

hvor  $Q_0$  er den tilsyneladende kildestyrke i frigørelsespunktet.

Udvaskning beskrives ved angivelse af den såkaldte udvaskningskoefficient,  $l_g$ , der er defineret som:

$$l_g = \frac{\text{aktivitetsmængde/samlet aktivitetsmængde}}{\text{varighed af nedbør}} \\ = \text{relativ ændring af aktivitetsmængde pr. tidsenhed.}$$

Mængden af materiale, der afsættes pr. arealenhed af jordoverfladen pr. tidsenhed, beregnes som:

$$(11) \quad W_N(x,y,s,u) = \frac{Q_N(x,t,s) \cdot l_g}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_y(x,s)}} \cdot \exp \left[ -\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x,s)^2} \right] \text{ [Ci/m}^2\text{/sek]}$$

hvor

$$l_g = \text{udvaskningskoefficient [sek}^{-1}\text{]} \\ Q_N(x,t,s) = Q_0(t) \cdot e^{-(l_g + \lambda) \cdot \frac{x}{u}} \text{ [Ci/sek]} \\ = \text{tilsyneladende kildestyrke korrigeret for udvaskning}$$

$$Q_0(t) = \text{tilsyneladende kildestyrke [Ci/sek] i frigørelsespunktet}$$

Hvor der er tale om middelkoncentrationer i givne afstande (se afsnit 1.2) erstattes faktoren,

$$\exp \left[ -\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x,s)^2} \right], \text{ i formel (11)}$$

med enten

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sigma_y(x,s)}{2 \cdot x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{2 \cdot \sigma_y(x,s)}} \right) - \operatorname{erf} \left( - \frac{x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{2 \cdot \sigma_y(x,s)}} \right) \right]$$

eller

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{90 \cdot \sigma_y(x,s)}{\alpha \cdot x}$$

Materialekoncentrationen i fanen, korrigeret for udvaskning, bliver:

$$\chi_N(x,y,z,s,u) = Q_N(x,t,s) \cdot Sg(x,y,z,s,u)$$

Under nedbør vil tør- og våddeponering (udvaskning) kunne forekomme samtidig. Antages de to deponeringsmekanismer at påvirke materialet i skyen (eller fanen) uafhængigt af hinanden kan det for deponering korrigerede kildeled,  $Q_{DN}(x,t,s)$ , beregnes som

$$(12) \quad Q_{DN}(x,t,s) = Q_0(t) \cdot \exp \left[ -(\lambda + 1_g) \cdot \frac{x}{u} \int_0^x \frac{v_g \cdot \sqrt{2} \cdot \exp(-\frac{1}{2} \cdot (\frac{H}{\sigma_z})^2)}{\pi \cdot \sigma_z(x,s)} dx \right]$$

Mængde af materiale, der pr. tidsenhed afsættes pr. arealenhed af jordoverfladen bliver

$$(13) \quad W_{DN}(s,y,s,u) = v_g \cdot Q_{DN}(x,t,s) \cdot Sg(x,y,-H,s,a) + \frac{Q_{DN}(x,t,s) \cdot 1_g}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_y(x,s)}} \cdot \exp \left[ -\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x,s)} \right] \quad [Ci/m^2/sek]$$

Både for tørdeponering og udvaskning gælder, at såfremt den deponerede mængde ikke fjernes fra det sted, hvor den deponeres, på anden måde end ved radioaktivt henfald, bliver den samlede deponerede mængde på et givet tidspunkt,  $t$ :



$$\begin{aligned}
 (14) \quad W(x,y,s,u,t,td_1,td_2) &= \int_{td_1}^t w(x,y,s,u) dt \\
 &= 0 \quad \text{for } t \leq td_1 \\
 &= w(x,y,s,u) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot (t - td_1)} \right] \quad \text{for } td_1 < t \leq td_2 \\
 &= w(x,y,s,u) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot (td_2 - td_1)} \right] \cdot e^{-\lambda \cdot (t - td_2)} \quad \text{for } td_2 < t
 \end{aligned}$$

hvor  $td_1$  = tidspunkt for deponeringens start

$td_2$  = tidspunkt for deponeringens slutning.

Det forudsættes, at udbredelsesforholdene og deponeringsparametrene ( $v_g$  og  $l_g$ ) ikke ændrer sig i det betragtede tidsrum.

Såfremt der over frigørelsesområdet findes et blandingslag, vil dette påvirke udbredelsesforholdene og dermed muligvis også deponeringen. De angivne formler (9) - (14) vil derfor ikke nødvendigvis gælde i et sådant tilfælde.

#### 1.5.2. Deponering af datterprodukt

Der betragtes den i afsnit 1.4. nævnte situation hvor en isotop, moderproduktet, og dets radioaktive datterprodukt begge frigøres fra kilden med de konstante hastigheder  $\epsilon_p$  [Ci/sek] henholdsvis  $\epsilon_d$  [Ci/sek]. Ved beregning af den for deponering korrigerede kildestyrke for datterproduktet, samt mængden af datterprodukt deponeret på jordoverfladen, må der tages hensyn til om moderproduktet deponeres på jordoverfladen eller ej.

Datterproduktets kildestyrke korrigeret for deponering bliver:

a. Moderproduktet deponeres ikke.

$$(15) \quad Q_d^*(x,s) = \epsilon_d \cdot \exp(-\lambda_d \cdot \frac{x}{u}) \cdot g(x,s) +$$

$$\frac{\epsilon_p \cdot \lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p + \lambda} \cdot (\exp(-\lambda_p \cdot \frac{x}{u}) - \exp(-\lambda_d \cdot \frac{x}{u})) \cdot g(x,s)$$

b. Moderproduktet deponeres.

$$(16) \quad Q_d^*(x,s) = (\epsilon_d \cdot \exp(-\lambda_d \cdot \frac{x}{u}) + \frac{\epsilon_p \cdot \lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p + \lambda} (\exp(-\lambda_p \cdot \frac{x}{u}) - \exp(-\lambda_d \cdot \frac{x}{u}))) \cdot g(x,s)$$

hvor

$$\begin{aligned}
 i &= l_t = \left( + \int_0^x \frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\exp(-\frac{1}{2} \cdot (\frac{H}{\sigma_z(x,s)})^2)}{\sigma_z(x,s)} dx \right) \cdot \frac{u}{x} \text{ for tørdeponering} \\
 &= l_g \text{ for våddeponering} \\
 &= l_g + \frac{u}{x} \cdot \int_0^x \frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\exp(-\frac{1}{2} \cdot (\frac{H}{\sigma_z(x,s)})^2)}{\sigma_z(x,s)} dx \text{ for samtidig tør- og våddeponering} \\
 g(x,s) &= \exp \left( - \int_0^x \frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\exp(-\frac{1}{2} \cdot (\frac{H}{\sigma_z(x,s)})^2)}{\sigma_z(x,s)} dx \right) \text{ for tørdeponering} \\
 &= \exp(-l_g \cdot \frac{x}{u}) \text{ for våddeponering} \\
 &= \exp \left( - \left[ l_g \cdot \frac{x}{u} + \int_0^x \frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\exp(-\frac{1}{2} \cdot (\frac{H}{\sigma_z(x,s)})^2)}{\sigma_z(x,s)} dx \right] \right) \text{ for samtidig våd- og tørdeponering}
 \end{aligned}$$

Øvrige betegnelser som tidligere angivet.

Det forudsættes, at der kan benyttes de samme deponeringsparametre for moderproduktet som for datterproduktet.

For at lette løsningen af de differential-ligninger, der benyttes ved udledning af udtrykket for datterproduktets kildestyrke ved tørdeponering, er funktionen  $g(x,s)$  blevet approksimeret med udtrykket  $\exp(-l_t \cdot \frac{x}{u})$ . Denne approksimation, der kun benyttes ved beregning af den mængde af datterproduktet, der dannes ved moderproduktets henfald under transporten fra kilden til det betragtede punkt, giver anledning til en lille overvurdering af såvel kildeleddet  $Q_d^*(x,s)$  som mængden af datterprodukt, der deponeres på jordoverfladen.

Mængden af materiale, der deponeres per arealenhed af jord-overfladen per tidsenhed, findes ved i formlerne (9), (11) og (13) at erstatte  $Q_D$ ,  $Q_N$  eller  $Q_{DN}$  med det relevante udtryk for  $Q_d^*$ .

Den samlede deponerede mængde af datterproduktet på et givet sted, bliver til et givet tidspunkt,  $t$ :

$$(17) \quad w_d(x, y, s, u, t) = \int_{td_1}^t w_d(x, y, s, u) dt$$

Hvis moderproduktet ikke deponeres, bliver udtrykkene for  $w_d$  som for  $w$ , d.v.s. de under formel (14) angivne udtryk. De følgende udtryk gælder derfor kun i de tilfælde, hvor både moder- og datterprodukt deponeres:

$$\begin{aligned} (18) \quad w_d(x, y, s, u, t, td_1, td_2) &= 0 \quad \text{for } t \leq td_1 \\ &= w_d(x, y, s, u) \cdot \frac{1}{\lambda_d} (1 - \exp(-\lambda_d \cdot (t - td_1))) \\ &+ w_p(x, y, s, u) \cdot \left( \frac{1}{\lambda_p} + \frac{1}{\lambda_d - \lambda_p} \cdot (\exp(-\lambda_d \cdot (t - td_1))) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\lambda_d}{\lambda_p} \cdot \exp(-\lambda_p \cdot (t - td_1))) \right) \quad \text{for } td_1 < t \leq td_2 \\ &= w_d(x, y, s, u) \cdot \frac{1}{\lambda_d} (1 - \exp(-\lambda_d \cdot (td_2 - td_1))) \cdot \exp(-\lambda_d \cdot (t - td_2)) \\ &+ w_p(x, y, s, u) \cdot \frac{1}{\lambda_d - \lambda_p} \cdot \left( \frac{\lambda_d}{\lambda_p} \cdot (1 - \exp(-\lambda_p \cdot (td_2 - td_1))) \cdot \exp(-\lambda_p \cdot (t - td_2)) \right. \\ &\quad \left. - (1 - \exp(-\lambda_d \cdot (td_2 - td_1))) \cdot \exp(-\lambda_d \cdot (t - td_2)) \right) \quad \text{for } td_2 < t \end{aligned}$$

Indeks d betegner datterprodukt og indeks p moderprodukt.

## 2. BEREGNING AF DOSER

### 2.1. Indåndingsdoser

En person, der på et givet tidspunkt befinder sig i et givet punkt,  $P(x,y,z)$  vil indånde radioaktivt materiale med en hastighed, der er lig produktet af indåndingshastigheden og koncentrationen af det radioaktive materiale i dette punkt.

Den resulterende dosis (i rem) til et givet organ (lunge, skjoldbruskkirtel etc.) beregnes som:

$$(19) D_I(x,y,z,s,u) = \beta \cdot S(x,y,z,s,u) \cdot \sum_{i=1}^{n_{iso}} \delta_{k,i}(d) \cdot I_i(x,te_1,te_2)$$

hvor

$\beta$  = indåndingshastighed [ $m^3/sek$ ]

$S(x,y,z,s,u)$  = relativ koncentration [ $sek/m^3$ ]

$s$  = stabilitetstype

$u$  = vindhastighed [ $m/sek$ ]

$\delta_{k,i}(d)$  = dosis til organ nr. k. pr. indåndet radioaktivitetsenhed af isotop nr. i. integreret fra det tidspunkt, hvor fanen har passeret punktet P til d dage efter dette tidspunkt. [rem/ci]

$I_i(x,te_1,te_2)$  = integreret kildeled [Ci]

$te_1$  = eksponeringstid start [sek]

$te_2$  = eksponeringstid slut [sek]

$n_{iso}$  = samlet antal isotoper i fanen.

### 2.2. Eksterne gammadoser

Den eksterne gamma-strålingsdosis til en person, der befinder sig i et givet punkt  $P(x_d,y_d,z_d)$  fås ved at integrere strålingsbidragene fra de enkelte volumenelementer af fanen. Indeholder fanen  $n_{iso}$  isotoper, hvis fotonenergier er fordelt på  $n_e$  energigrupper, kan gammadosis (i rem) i punktet P findes som:

$$(20) D_G(x_d,y_d,z_d,s,u) = \frac{K}{4\pi} \cdot \sum_{k=1}^{n_e} E_k^Y \cdot \sigma_k^Y \cdot \sum_{i=1}^{n_{iso}} \bar{\epsilon}_{k,i}$$

$$\int_{\max(0, u \cdot (te_1 - tf_2))}^{u \cdot (te_2 - tf_1)} \frac{I_i(x, te_1, te_2)}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x, s) \cdot \sigma_z(x, s) \cdot u} \cdot$$

$$\left[ \int_{-H}^{\infty} \left( \exp\left(-\frac{z^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2 \cdot H)^2}{2 \cdot \sigma_z(x, s)^2}\right) \right) \cdot$$

$$\left. \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\mu_k \cdot r) \cdot e^{-\mu_k \cdot r}}{r^2} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x, s)^2}\right) dy \right] dz \right] dx$$

hvor

$$r^2 = (x-x_d)^2 + (y-y_d)^2 + (z-z_d)^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

s = stabilitetskategori

tf<sub>1</sub> = tidspunkt for frigørelsens start [sek]

tf<sub>2</sub> = tidspunkt for frigørelsens slutning [sek]

te<sub>1</sub> = tidspunkt for eksponeringens start [sek]

te<sub>2</sub> = tidspunkt for eksponeringens slutning [sek]

K = omsætningsfaktor, dosishastighed/(absorberet energi pr. gram pr. Ci) [(rem/sek)/(MeV/g)/Ci]

n<sub>e</sub> = antal energigrupper

E<sub>k</sub><sup>Y</sup> = middel-fotonenergi i k'te energigruppe [MeV]

σ<sub>k</sub><sup>Y</sup> = σ<sub>k</sub><sup>Y</sup>(E<sub>k</sub><sup>Y</sup>) = energiabsorptionskoefficient for luft, i k'te energigruppe [m<sup>2</sup>/g]

f<sub>k,i</sub> = fotonudbytte for isotop nr. i, i den k'te energigruppe

μ<sub>k</sub> = μ(E<sub>k</sub>) = lineær dæmpningskoefficient for luft, i k'te energigruppe [m<sup>-1</sup>]

B(μ<sub>k</sub> · r) = 1 + K(E<sub>k</sub>) · μ<sub>k</sub> · r, build-up faktor for k'te energigruppe

I<sub>i</sub>(x, te<sub>1</sub>, te<sub>2</sub>) = integreret kildeled for isotop nr. i. [Ci]

I det integrerede kildeled kan der tages hensyn til dannelse af datterprodukter (se afsnit 1.4) og til deponering (se afsnit 1.5).

Modellen for eksterne gammadoser fra en fane tager ikke hensyn til eksistensen af et eventuelt blandingslag.

### 2.3. Eksterne gammadoser fra deponeret radioaktivt materiale

Den eksterne gammadosis fra radioaktivt materiale deponeret på jordoverfladen til en person, der befinder sig "i" et givet punkt, findes ved at integrere dosisbidragene fra de enkelte del-elementer af jordoverfladen. Ved beregningen forudsættes, at jordoverfladen kan betragtes som en uendelig fladekilde, hvor det radioaktive materiale er deponeret med konstant tæthed, svarende til tætheden på jordoverfladen umiddelbart under det betragtede punkt. Dosis beregnes i punkter, der ligger 1 meter over jordoverfladen.

Dosis bliver:

$$(21) D_S(x,y,s,u) = 23.04 \cdot \sum_{k=1}^{n_e} E_k^Y \cdot \text{Ex}(\mu(E_k^Y) \cdot 1) \cdot \mu_{\text{en}}(E_k^Y) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{iso}}} f_{k,i} \cdot \int_{te_1}^{te_2} W_i(x,y,s,u,t,td_1,td_2) dt$$

hvor

$D_S(s,y,s,u)$  = extern gammadosis 1 meter over jordoverfladen fra radioaktivt materiale deponeret på denne (Rem).

$\mu_{\text{en}}(E_k^Y)$  = lineær energiabsorptionskoefficient for luft for fotonenergien  $E_k^Y$  (meter<sup>-1</sup>)

$\mu(E_k^Y)$  = lineær dæmpningskoefficient for luft for fotonenergien  $E_k^Y$  (meter<sup>-1</sup>)

$k$  = energigruppe nummer ( $1 \leq k \leq 8$ )

$i$  = isotop nummer

$n_{\text{iso}}$  = antal isotoper

$n_e$  = antal energigrupper

$E_k^Y$  = middel foton-energi for energigruppe nr. k.

$F_{i,k}$  = fotonudbytte for isotop nr. i. i den k'te energigruppe

$$Ex(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} \frac{e^{-\rho}}{\rho} d\rho$$

$W(x, y, s, u, t, td_1, td_2) =$   
 koncentration af isotop nr. i ( $Ci/m^2$ ) på  
 jorden lodret under detektorpunktet til  
 tiden t, når depositionen sker i tidsrummet  
 fra  $td_1$  til  $td_2$  (se iøvrigt afsnit 1.5).

$te_1$  = starttid for eksponering (sek)

$te_2$  = sluttid for eksponering (sek)

$td_1$  = starttid for deponering (sek)

$td_2$  = sluttid for deponering (sek)

Det bemærkes, at udtrykket (22) hverken tager hensyn til den af jordoverfladens ruhed forårsagede skærmningsvirkning eller til build-up af dosis.

### 3. DATA

I dette afsnit redegøres kort for nogle af de data, som indgår i de på grundlag af modellerne udarbejdede datamatprogrammer.

#### 3.1. Udbredelsesparametre

Atmosfærens stabilitet klassificeres i de af Pasquill angivne 6 klasser A - F [5,2]. For stabilitetsklasserne benytter de af Turner [2] angivne 10 minutters middelværdier for udbredelsesparametrene ( $\sigma_y(x,s)$  og  $\sigma_z(x,s)$ ).

#### 3.2. Effektiv udbredelseshøjde

Den effektive udbredelseshøjde, H, antages at være konstant og dermed uafhængig af afstanden fra frigørelsespunktet. Termisk løft af den frigjorte aktivitet beregnes på grundlag af Briggs' formel (appendiks I, afsnit 1.5 af denne rapport). Ved beregning af opstigningen ses bort fra henfaldsvarmen og fra den medfølgende damp frigørelse af varme ved kondensation.

#### 3.3. Datterprodukter

Ved beregning af eksterne gammadoser fra luftbårent såvel som fra deponeret radioaktivt materiale benyttes følgende forenklede henfaldskæder:

	moderprodukt			datterprodukt	
a.	Kr	85 m	→	Kr	85
b.	Kr	88	→	Rb	88
c.	Kr	89	→	Rb	89
d.	Sr	90	→	Y	90
c.	Sr	91	→	Y	91
d.	Zr	95	→	Nb	95
e.	Zr	97	→	Nb	97
f.	Mo	99	→	Tc	99 m
g.	Ru	105	→	Rh	105
h.	Ru	106	→	Rh	106
i.	Te	129 m	→	Te	129
j.	Te	131 m	→	Te	131
k.	Te	132	→	I	132
					forts.



	moderprodukt		datterprodukt
l.	Sb 127	→	Te 127
m.	Sb 129	→	Te 129 m
n.	I 131	→	Xe 131 m
o.	I 133	→	Xe 133
p.	I 135	→	Xe 135
q.	Xe 133 m	→	Xe 133
r.	Xe 135 m	→	Xe 135
s.	Xe 137	→	Cs 137
t.	Xe 138	→	Cs 138
u.	Ba 140	→	La 140
v.	Ce 143	→	Pr 143
w.	Ce 144	→	Pr 144
x.	Nd 147	→	Pm 147
y.	Np 239	→	Pu 239

### 3.2. Deponerbarhed

Argon 41 samt alle Krypton- og Xenon isotoper regnes som værende ikke deponerbare. De øvrige betragtede isotoper regnes som deponerbare.

### 3.3. Data for beregning af eksterne gammadoser

#### 3.3.1. Gamma energigrupper

Den i tabel 1 viste opdeling i energigrupper er fundet mest hensigtsmæssig ved beregning af eksterne gammadoser (11).

**Tabel 1**  
**Gruppeopdeling for fotonenergier**

Gruppe nr.	Energigrænser (MeV)	Middelenergi (MeV)
1	0-0.080	0.04
2	0.081-0.150	0.12
3	0.151-0.250	0.20
4	0.251-0.510	0.38
5	0.511-0.850	0.68
6	0.851-1.330	1.09
7	1.331-2.030	1.68
8	2.031-3.000	2.53

3.3.2. Isotopernes fotonudbytter fordelt på energigrupper

**Tabel 2**  
**Isotopernes fotonudbytte i energigrupper**

Isotop	Energi gruppe nr.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ar 41						1.00		
Kr 83m	0.09							
Kr 85m		0.74		0.13				

(fortsættes)

Isotop	Energi gruppe nr.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Kr 87				0.84	0.16			0.35
Kr 88			0.42	0.05	0.23		0.14	0.53
Kr 89			0.31	0.99		0.55	0.70	0.42
Rb 88						0.13	0.21	0.02
Rb 89					0.17	1.29		0.27
Sr 91					0.42	0.33	0.05	
Zr 95					0.98			
Zr 97					0.92			
Nb 95					1.00			
Nb 97					1.00			
Mo 99	0.02		0.07	0.01	0.16			
Tc 99m		0.90						
Ru 103				0.88	0.06			
Ru 105				0.43	0.64			
Rh 105				0.24				
Rh 106				0.21	0.11	0.03		
Te 129m					0.06			
Te 129	0.19			0.17	0.01	0.02		
Te 131m	0.02	0.05	0.16	0.09	0.91	0.24	0.06	
Te 131		0.68		0.21	0.04	0.13		
Te 132	0.17		0.90					
I 131	0.03			0.87	0.09			
I 132			0.01		2.53	0.35	0.17	
I 133					0.90			
I 134		0.03		0.08	1.21	0.76	0.14	
I 135				0.07		0.91	0.42	
Xe 131m			0.02					
Xe 133m			0.14					
Xe 133	0.37							
Xe 135m					0.80			
Xe 135			0.91		0.03			
Xe 137				0.33				
Xe 138				1.32			0.65	
Cs 134					2.20	0.03	0.03	
Cs 136	0.11	0.06	0.36	0.71	1.00	1.02		

(fortsættes)

Isotop	Energi gruppe nr.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Cs 137					0.85			
Cs 138				0.23	0.08	0.25	0.73	0.27
Ba 140	0.11		0.06	0.11	0.34			
La 140				0.60	0.19	0.10	0.96	0.03
Ce 141		0.48						
Ce 143	0.11			0.48	0.15	0.02		
Ce 144	0.02	0.11						
Pr 144					0.02			
Nd 147		0.28		0.20				
Pm 149				0.02				
Pu 238								
Pu 239								
Pu 240								
Pu 241								
Ru 86						0.088		
Te 127m								
Te 127								
Sb 127				0.45	0.66	0.012		
Sb 129			0.029	0.084	0.75	0.44	0.093	
Np 239		0.23	0.16	0.14				
Am 241	0.36							
Cm 242								
Cm 244								

Kilde: reference 8, 9 og 11

Bem.: Fotonudbytter under 1% (0.01) er ikke medtaget, hverken i tabellen eller i beregningerne af eksterne gammastrålingsdoser.

3.3.3. Dosis build-up faktor, energiabsorptionskoefficient  
og lineær absorptionskoefficient for luft for energigrupper.

Tabel 3  
Data for energigrupper.

Energi gruppe nr.	Energi absorptions- koefficient, $(\frac{\mu_{en}}{\rho})$ (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Lineær dæmnings- koefficient $\mu$ (m <sup>-1</sup> )	Dose build-up faktor koef- ficient, $K_E$
1	6.57 E-2	3.15 E-2	2.70
2	2.40 E-2	1.89 E-2	5.10
3	2.71 E-2	1.60 E-2	3.57
4	2.94 E-2	1.28 E-2	2.37
5	2.93 E-2	9.99 E-3	1.64
6	2.73 E-2	7.90 E-3	1.24
7	2.47 E-2	6.30 E-3	0.97
8	2.17 E-2	5.00 E-3	0.79

Kilde: reference 10 og 11.

Bem.: Build-up faktoren er defineret som  $B_E(r) = 1 + K_E \cdot \mu \cdot r$ ,

$$\text{hvor} \quad K_E = \frac{\mu - \mu_{en}}{\mu_{en}}$$

3.4. Dosisfaktorer for isotoper som indåndes

Dosisfaktorer, som angiver forholdet mellem den mængde af en given isotop, der indåndes, og den resulterende dosis til det betragtede organ, integreret fra det tidspunkt hvor fanen har passeret til et givet antal dage efter dette tidspunkt, er taget fra WASH 1400 [3, tabel D-2] .

I modellerne benyttes dosisfaktorer for følgende integrationsperioder:

Knoglemarv:	30 dage	
Lunger:	365	" (1 år)
Mave-tarmkanal:	7	"
Skjoldbruskkirtel:	30	"

Dosisfaktoren for knoglemarv er beregnet som dosisfaktoren for perioden 7 dage plus 0.5 gange dosisfaktoren for perioden fra 8 til 30 dage efter eksponeringen. De således beregnede dosisfaktorer kan derved benyttes ved beregninger af akutte skader [3, afsnit 9.2.2.1].

Indåndingshastigheden for voksne er sat til  $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sek.}$

# REFERENCER

1. Thykier-Nielsen, S.: Modeller til beregning af eksterne gammadoser og inhalationsdoser fra frigørelser til atmosfæren af radioaktive stoffer, Risø-M-1725 (1974) 48 pp. Errata til Risø-M-1725 (1974) 6 pp.
2. D. Bruce Turner, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. (National Air Pollution Control Association, Cincinnati, Ohio, (1969). (Public Health Service Publication No. 999-AP-26) 84 pp.
3. Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, Appendix VI, Wash-1400 (NUREG-75/014) USNRC, 1975.
4. D.H. Slade (editor), Meteorology and Atomic Energy - 1968. TID-24190 (1968) 415 pp.
5. F. Pasquill, The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. Meteorol. Mag., 90 (1961) 33-49.
6. A.J. Brook, The Effect of Deposition on the Concentration of Windborne Material, AHSB(S)-R 157 (1968) 9 pp.
7. J.R. Beattie and P.M. Bryant, Assessment of Environmental Hazards from Reactor Fission Product Releases, AHSB(S)R-135 (1970) 54 pp.
8. C.M. Lederer, J.M. Hollander, and I. Perlman, Table of Isotopes. 6. edition (Wiley, New York, 1967) 594 pp.
9. Handbook of Chemistry and Physics, 55 ed. (CRC Press Inc., Cleveland, Ohio, 1974).
10. Radiological Health Handbook. Revised edition. (U.S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Rockville, Md., 1970). (Public Health Service Publication, 2016) 458 pp.
11. Fenger, J.: Isotopdata for beregning af eksterne gammadoser og inhalationsdoser (Risø, 1975).
12. F.A.Gifford, The Rise of Strongly Radioactive Plumes. Appl. Meteorol 6 (1967) 44-49.

### **APPENDIKS 3**

#### **METEOROLOGI**



## 1. ATMOSFÆRISK SPREDNING

### 1.1. Generelt om den gaussiske spredningsmodel

De radioaktive materialer, der slippes ud i atmosfæren som følge af et uheld på et atomkraftværk, vil blive ført med af vinden og udbrede sig som en røgfane. Transporten og opblandingen af materialerne vil være bestemt ved atmosfærens tilstand langs udbredelsesretningen, af områdets topografi samt af de udslepne stoffers egenskaber. Vindretningen, vindhastigheden og den vertikale temperaturgradient er de vigtigste atmosfæriske parametre, idet de bestemmer transportretningen, fortyndingen i udslipøjeblikket samt den turbulente opblanding.

Den såkaldte gaussiske spredningsmodel, der er den grundlæggende spredningsmodel i WASH-1400 og i dette studie, er en metode til at beskrive hvorledes en røgfane udbreder sig i atmosfæren. Til trods for at denne metode har adskillige svage sider, er den i dag den mest anvendte ved praktiske beregninger af faner fra enkeltkilder. Dette skyldes dels, at den i sin simpleste form kun behøver meteorologiske målinger i ét punkt, dels at de til modellen tilskrevne spredningsparametre inkorporerer megen empirisk viden om faners opførsel, således at der ofte bliver kompenseret for modellens teoretiske svagheder.

De spredningsforhold, der kommer nærmest de idealiserede antagelser bag modellen, er karakteriseret ved, at spredningen finder sted over horisontalt homogent terræn, ud til en afstand på nogle få km fra kilden, for kildehøjder mindre end 100-200 m, for stabilitetsforhold, der hverken er ekstremt stabile eller ustabile, med en jævn god vind, og for målinger med midlingstider fra 10 til 60 minutter. Verifikationseksperimenter af modellen foretaget under sådanne betingelser har vist, at modellen vil være i stand til at forudsige koncentrationer inden for en faktor 2-3 [1 og 2]. Brug af den gaussiske model, hvor disse betingelser ikke er opfyldt, er baseret på ekstrapolationer, der søger at inkludere den viden, man har om spredning i atmosfæren.

Spredningsparametrene  $\sigma_z$  og  $\sigma_y$ , der anvendes i modellen er funktioner af afstanden fra udslipsstedet og af atmosfærens stabilitet. (For en definition af  $\sigma_y$  og  $\sigma_z$ , se appendiks 1. Bredden af

fanen er  $\sim 30\%$ ). Afhængigheden af stabiliteten er givet ved syv diskrete stabilitetskategorier, de såkaldte Pasquill-kategorier, der hver kan specificeres ved enten en temperaturvariation over atmosfærens nederste 100 meter som angivet i Tabel 3.1 [1], eller ved en klassifikation efter solindstråling, skydække og vindhastighed [3].

De meteorologiske data fra Risø og Gladsaxe er klassificeret efter førstnævnte metode og dataene fra Kastrup og Værløse efter den anden metode. Metoderne er ikke helt sammenlignelige, idet den sidstnævnte kategoriserer alle tilfælde med vind større end 6 m/sek som værende C eller D, hvorfor disse kategorier vil få en relativt større hyppighed beregnet ved denne metode. Dette fremgår tydeligt af de senere omtalte tabeller 3.2, 3.3 og 3.4.

Tabel 3.1

Atmosfæriske stabilitetskategorier

Beskrivelse	Kategori	$T(100 \text{ m}) - T(0) \text{ m}$
meget ustabil	A	$< -1.9$
ustabil	B	$-1.9 \text{ til } -1.7$
let ustabil	C	$-1.7 \text{ til } -1.5$
neutral	D	$-1.5 \text{ til } -0.5$
let stabil	E	$-0.5 \text{ til } 1.5$
meget stabil	F + G	$> 1.5$

Systemet af stabilitetskategorier defineret ud fra rutinemæssige meteorologiske målinger er blevet indført som et praktisk substitut for turbulensmålinger. Direkte turbulensmålinger ville give en mere pålidelig indikation af de spredningsmæssige forhold i atmosfæren, men sådanne målinger er endnu for specialiserede og for komplekse til at kunne indgå som rutinemålinger.

#### 1.2. Midlingstidens indflydelse på tidsmiddel koncentrationen

En fane kan opfattes som en successiv følge af elementarsektioner der opfører sig som individuelle puf. Det er indlysende

at mængden af materiale indeholdt i et element af fanen af en given længde i vindretningen, vil være omvendt proportional med vindhastigheden. Spredningen vinkelret på vindretningen, horisontalt og vertikalt, forøges med afstanden fra kilden under indflydelse af små-skala bevægelser.

Trajektorier af successive sektioner af fanen er ikke identiske men spredes irregulært af stor-skala bevægelser i strømmingen. Dette resulterer i en progressiv udvidelse af fanens dimensioner vinkelret på udbredelsesretningen. Den gennemsnitlige koncentration, der findes nedenstrøms fra en punktkilde, aftager således ikke alene med afstanden fra kilden, men også med eksponeringstiden. Dette er en vigtig egenskab ved tids-middel koncentrationen, en egenskab der essentielt er en konsekvens af, at der eksisterer bevægelser i strømmingen på en skala der er større end fanens tværsnit.

Begge typer af spredning, såvel stor- som små-skala spredning, bringes ind i den gaussiske spredningsmodel gennem spredningsparametrene. Da disse er eksperimentalt bestemt ved midlingstider fra 10 til 60 minutter, er det derfor klart, at benyttes de til bestemmelse af tidsmiddel koncentrationen over betydeligere længere tidsrum, f.eks. svarende til BWR2 og BWR3 uheldenes 3 timers udslip, vil de beregnede koncentrationer, alt andet lige, blive for store.

Dette forhold er der taget hensyn til i WASH-1400, idet den horisontale spredning forøges med en faktor:  $(\text{midlingstiden/halv time})^{1/3}$ .

Tager man ikke hensyn til den mulige overvurdering af de beregnede koncentrationer ved lange midlingstider, findes det i appendiks 2, at de størst beregnede knoglemarvsdoser i 20 kilometers afstand fra kilden fås for et BWR2 uheld - Pasquill kategori F. I det følgende vil der blive foretaget et skøn af overvurderingen.

Under stærkt stabile vejrforhold, Pasquill kategori F + G, vil turbulensen være svag og dermed også små-skala spredningen. For korte midlingstider, 10 til 60 minutter, vil koncentrationen i fanen falde meget langsomt med afstanden fra kilden, idet fanens bredde og højde kun ændres langsomt. For længere midlingstider vil stor-skala spredningen, forårsaget af store horisontale hvirvler, yde et dominerende bidrag til spredningen. De store hvirvler

vil give fanen et stærkt bugtende forløb, hvorfor fænomenet ofte kaldes meandering.

En faststående iagttager redenstrøms for kilden vil, efterhånden som fanen passerer, skiftevis befinde sig mellem bugterne og skiftevis i den smalle fane. En realistisk beregning af den gennemsnitskoncentration iagttageren udsættes for kræver tydeligvis, at der tages hensyn til "meanderingeffekten", dvs. at til det  $\sigma_y$  der svarer til små-skala spredningen, og som tilnærmelsesvis er lig det der fås fra det anvendte formelsæt [2], også lægges et  $\sigma_{ym}$  svarende til stor-skala spredningen. Den horisontale spredning bliver da bestemt ved

$$\sigma_{y\text{total}} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_{ym}^2} \quad (1)$$

idet et approximativt udtryk for  $\sigma_{ym}$  kan findes ud fra den statistiske diffusionsteori [3]:

$$\sigma_{ym}^2 = 2 \sigma_v^2 J_L^2 \left( \frac{x}{UJ_L} - 1 + \exp\left(-\frac{x}{UJ_L}\right) \right) \left( 1 + 2 \frac{J_E}{T} \right)^{-1} \quad (2)$$

hvor

- x er afstanden fra kilden til målepunkt, m.
- T er midlingstiden, sek.
- U er middelvindhastigheden i middelvindvektorens retning (over tiden T), m sek<sup>-1</sup>.
- $\sigma_v^2$  er variansen af vindvektorens komponent vinkelret på middelvindretningen, m<sup>2</sup> sek<sup>-2</sup>.
- $J_L$  er den Lagrangske tidsskala, der er en karakteristisk tid for de store hvirvler, sek.
- $J_E$  er den Eulerske tidsskala, der er en karakteristisk tid for de atmosfæriske bevægelser observeret fra udslipspunktet, sek.

Et års data (1975) fra Risø's meteorologimast blev gennemgået for vejr-situationer af type Pasquill F + G med en varighed på mindst 3 timer og en vindhastighed mellem 1 og 3 m sek<sup>-1</sup>.

Målingerne er 10 minutters middelværdier; vindretning og -hastighed er målt i højden 117 m. I alt fandtes 12 situationer, og for hver af disse beregnedes  $\sigma_v$  og  $U$ . Resultatet ses i Tabel 3.5. På Fig. 3.2 er vist vindvektorens komposant vinkelret på middelvindretningen. Det fremgår af figuren, at i flere af tilfældene sker der en jævn drejning af vindretningen, et fænomen der selvsagt vil gøre  $\sigma_{ym}$  meget stor i forhold til  $\sigma_y$ .

Som beregningseksempel vælger vi tilfælde 8, der, såfremt vindretningen havde været mere østlig, er den vejr-situation, der giver de største beregnede knoglemarvsdoser i København som følge af et BWR2 uheld på Barsebäck, når der ikke tages hensyn til meanderingeffekten.

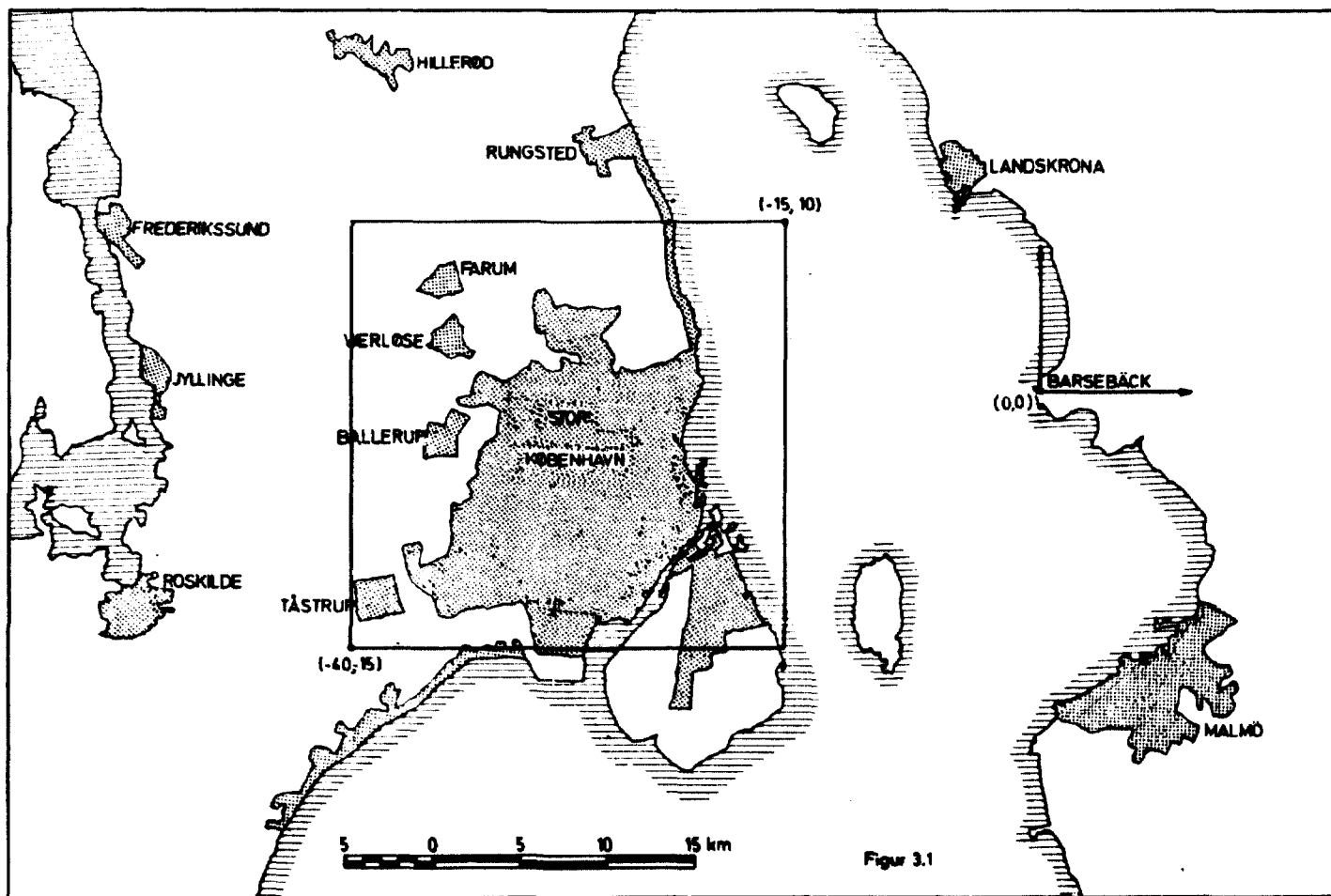
Tabel 3.5 giver  $\sigma_v = 0.47 \text{ m sek}^{-1}$  og  $U = 1.99 \text{ m sek}^{-1}$ .  $J_E$  skønnes ud fra Fig. 3.2 til at være 1 time og  $J_L$  må være af størrelse lig afstanden mellem København og Barsebäck divideret med  $U$ , dvs. ca. 3 timer. Indsættes i (2), fås  $\sigma_{ym} \sim 3000 \text{ m}$ , til sammenligning med det i beregningerne anvendte  $\sigma_y = 500 \text{ m}$ , hvilket vil sige, at spredningen er undervurderet med en faktor 6.

For at undersøge om denne effekt er lige så kraftig over vand, har vi udført en tilsvarende undersøgelse af 12 dages data fra et eksperiment i Kattegat. En mast med højden 15 m over vandoverfladen var rejst 50 km fra nærmeste kyst. Resultatet af undersøgelsen ses i Tabel 3.6, Fig. 3.3. Konklusionen er, at for disse data er meanderingeffekten lige så udtalt som den fundet over land.

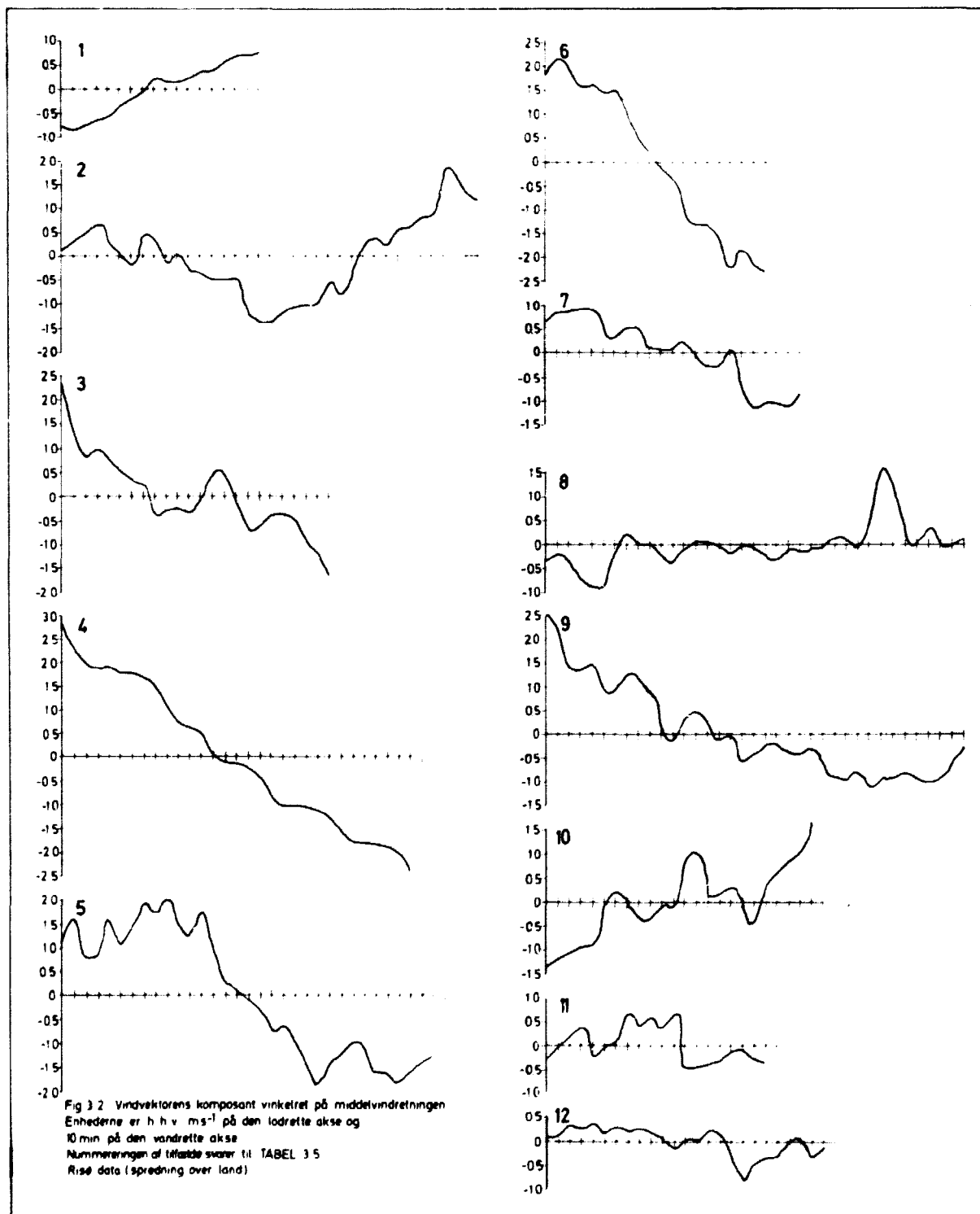
## 2. Statistik

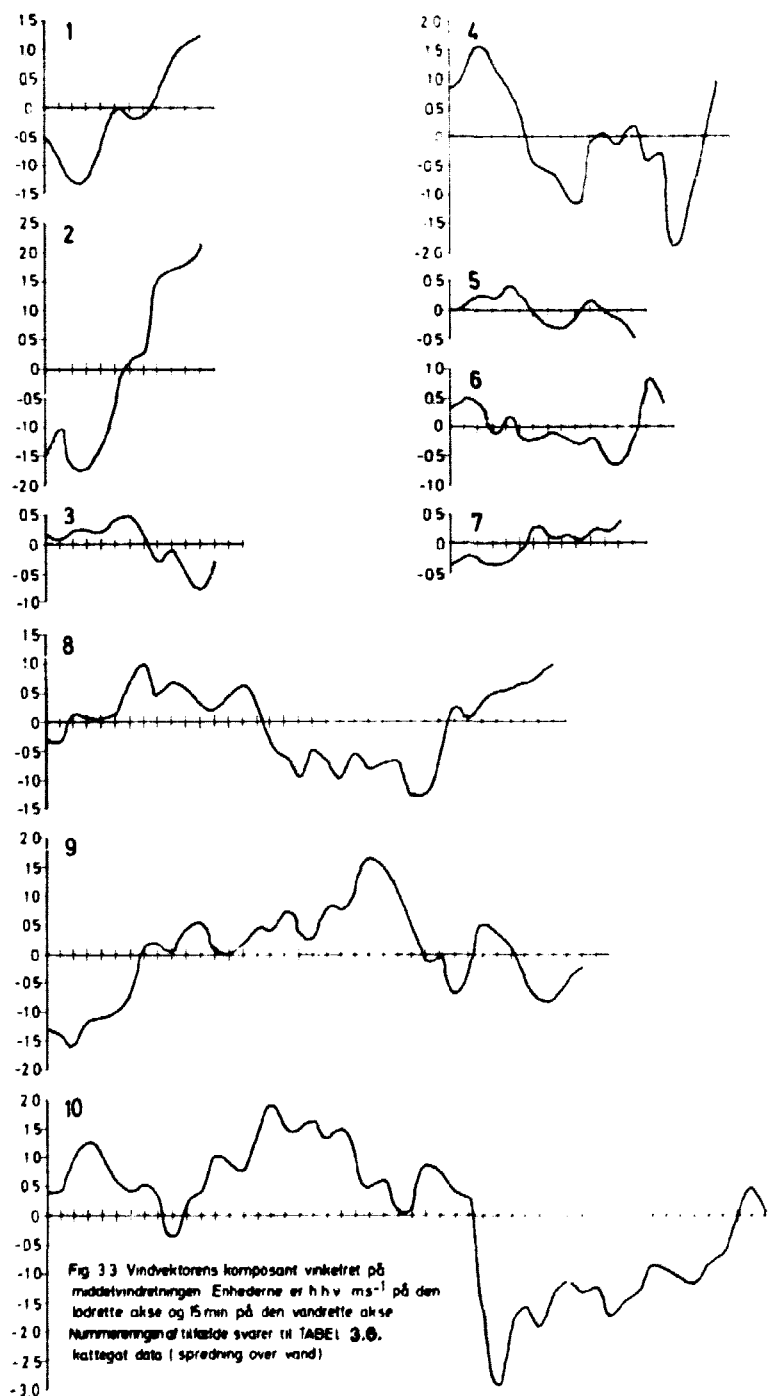
Den statistiske analyse i dette afsnit bygger på den antagelse, at ved et uheld på Barsebäck vil det radioaktive materiale blive sluppet ud i atmosfæren i et tidsrum, der er mindre end en time. Udslippet vil da kunne karakteriseres ved et puf, og spredningen af dette puf vil kunne beregnes ved hjælp af den gaussiske spredningsmodel. Denne antagelse er i overensstemmelse med WASH-1400.

De meteorologiske variable, vindhastighed, vindretning og temperatur, tænkes at opføre sig ensartet i ethvert punkt inden for et passende stort geografisk område, og på en sådan måde som de er blevet målt time for time henholdsvis på Risø og i Kastrup.

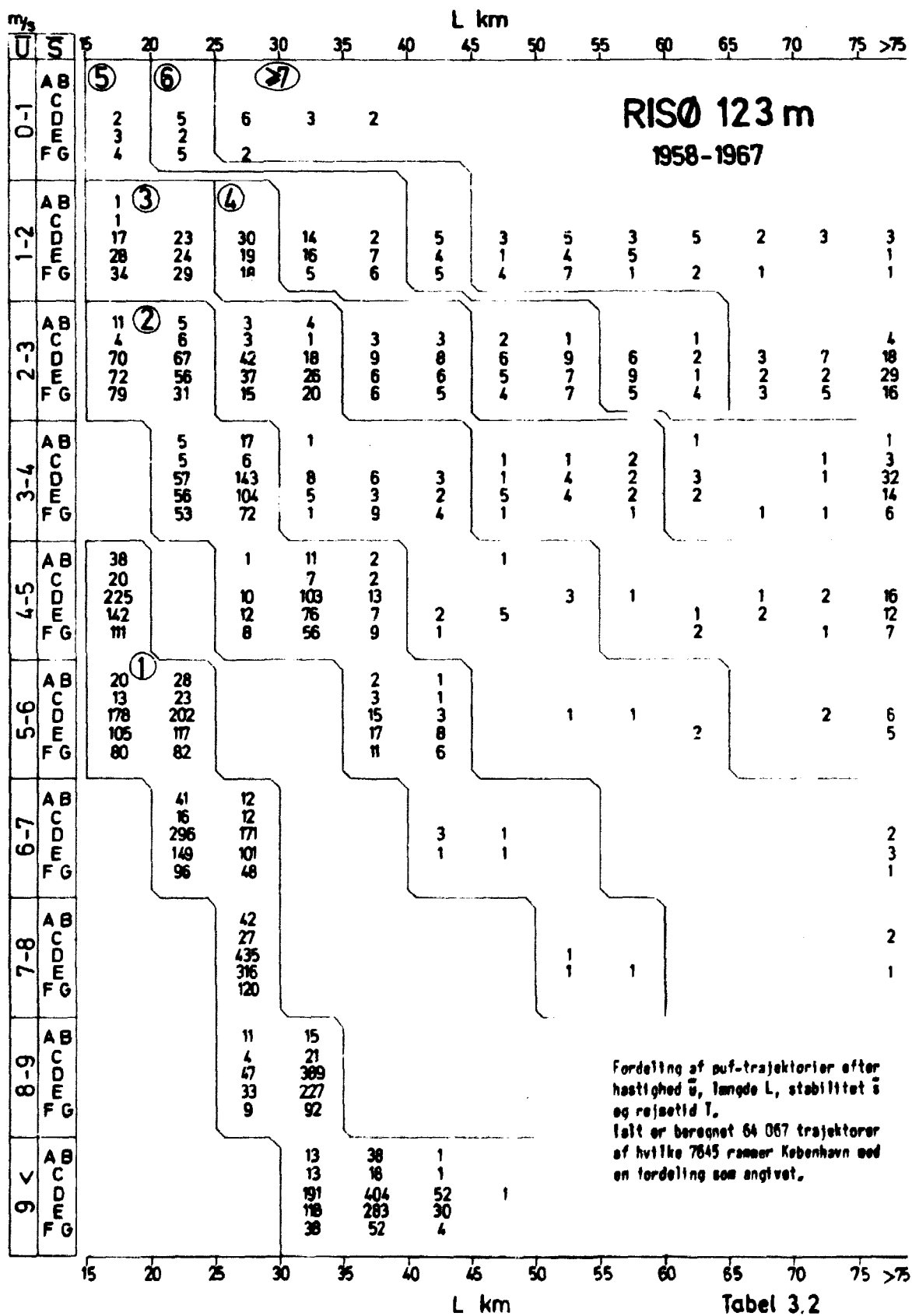


Figur 3.1









		L km													
		15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	>75
u	s														
		AB	BC	CD	DE	EF	FG								
0-1	AB	⑤	⑥	⑦											
	BC	1	7	20	8	4	1								
	CD	32	52	20	16	8	2								
	DE	90	68	69	28	6									
1-2	AB	2	2	④	2	2	8	9	8	12	6	4	4	3	
	BC	③	③	④	④	2	2	19	23	20	20	12	7	5	
	CD	137	150	100	26	24	37	11	7	4	4	2			
	DE	267	249	165	67	37	22	11	7	4	4	2			
2-3	AB	14	14	5	2	1	1	7	13	1	1	7	1	5	
	BC	②	②	②	②	②	②	12	9	4	9	4	3	31	
	CD	309	247	156	65	16	10	2	3	4	10	4	2	31	
	DE	470	308	147	63	20	16	2	3	4	2	1	1	2	
3-4	AB		10	47	2	1	1	2	3	1	1	1	3	3	
	BC		14	38	12	7	3	4	5	6	4	3	2	30	
	CD		232	565	6	8	3			6	2		1	22	
	DE		238	405	3									3	
4-5	AB	60		5	25	3								2	
	BC	32		4	14									3	
	CD	649		35	324	43	1	1			3	2	1	15	
	DE	414		32	127	21	2		2			1		4	
5-6	AB	33	31		3	3								13	
	BC	①	①		①	①								3	
	CD	20	18		2	2				1	2				
	DE	374	338		32	4									
6-7	AB		36	14											
	BC		22	7											
	CD		378	191			1	1							
	DE		143	69											
7-8	AB			34											
	BC			42											
	CD			396											
	DE			158											
8-9	AB			8	18										
	BC			3	14										
	CD			31	196										
	DE			3	63										
9 <	AB				7	20	2								
	BC				7	8									
	CD				64	123	2								
	DE				9	51									

RISØ 7m  
1958-1967

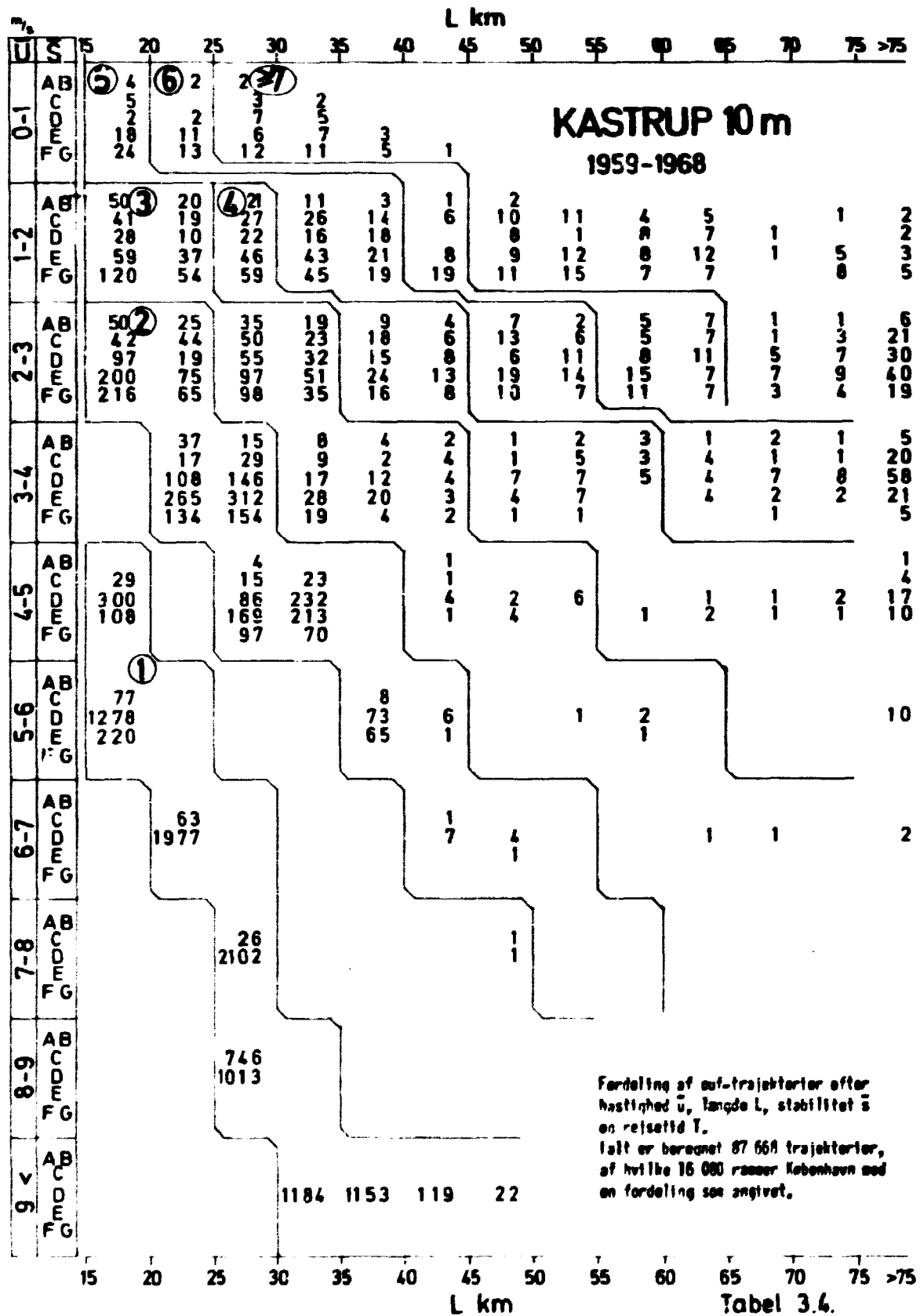
Fordeling af puf-trajektorier efter  
hastighed u, længde L, stabilitet s  
og rejsetid T.  
Ialt er beregnet 75 009 trajektorier,  
af hvilke 12 709 rammer København med  
en fordeling som angivet.

Tabel 3.3.

RISØ 7m  
1958-1967

Fordeling af puf-trajektorier efter  
hastighed  $\bar{u}$ , længde L, stabilitet  $\bar{s}$   
og rejsetid T.  
Ialt er beregnet 75 009 trajektorier,  
af hvilke 12 709 rammer København med  
en fordeling som angivet.

Tabel 3.3.



Tabel 3.5

Karakteristika for de i 1975 tolv forekomne tilfælde med stabilitetskategori F + G og vindhastighed mellem 1 og 3 m/s i mindst tre sammenhængende timer. Data fra Risøs meteorologimast.

TILFÆLDE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VARIGHED MIN.	180	370	240	310	330	200	230	410	430	240	200	250
MIDDELVIND- HAST. m/s	1.17	1.16	1.96	1.69	1.69	1.89	2.43	1.99	2.28	2.09	1.51	1.74
MIDDELRETN. Grader	73	58	90	235	200	92	338	36	102	196	220	24
STDV * m/s	0.53	0.84	0.84	1.51	1.33	1.56	0.68	0.47	0.91	0.75	0.36	0.28

\* Standardafvigelsen på 10 minutters middelværdier af vindvektorens komponent vinkelret på middelvindretningen.

Tabel 3.6

Karakteristika for de i perioden 28/5 - 10/6 1973 ti forekomne tilfælde med stabil temperaturgradient og vindhastighed mindre eller lig 3 m/s i mindst tre sammenhængende timer. Data fra meteorologimast i Kattegat.

Tilfælde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Varighed min.	180	180	195	300	210	240	195	555	585	825
Middelvindhast. m/s	1.44	1.30	2.32	2.12	2.14	2.84	2.27	2.08	2.10	0.91
Middelretn. grader	151	234	216	312	312	225	235	246	347	130
Stdv * m/s	0.83	1.39	0.80	0.93	0.34	0.40	0.84	1.51	2.00	1.06

\* Standardafvigelsen på 15 minutters middelværdier af vindvektorens komponent vinkelret på middelvindretningen.

Barsebäck er placeret midt i området, og København approximeres med den på Fig. 3.1 angivne firkant af størrelse  $25 \times 35$  km. Mindste afstand til Barsebäck er - konservativt - sat til 15 km.

Idet man nu tænker sig, at der slipper et puf ud fra Barsebäck hver time, spørges der om, hvor mange puf der vil ramme København i løbet af 10 år. Hvert puf bevæger sig ad en trajektorie, der beregnes ud fra vindhastighed og vindretning. Rammer puffet København inden 12 timer efter udslipet, registreres rejsetiden  $T$ , og der beregnes en tidslig middelvindhastighed  $\bar{u}$  og en tidslig middelstabilitet  $\bar{s}$  langs trajektorierne. Stabiliteten beregnes for Risø dataenes vedkommende ud fra temperaturmålinger i højderne 56 og 6 m og konverteres til en diskret kategori efter tabel 3.1. For Kastrup dataenes vedkommende er stabiliteten bestemt som beskrevet i afsnit 1.1.

Hermed er nu ethvert puf, hvis trajektorie har ramt København, karakteriseret ved tre tal, nemlig 1) rejsetid  $T$ , 2) middelvindhastighed  $\bar{u}$  og 3) middelstabilitet  $\bar{s}$ . Trajektorielængden  $L$  fås af  $L = T \cdot \bar{u}$ ; en længde der kan betragtes som en ækvivalent afstand mellem Barsebäck og København. Denne afstand kan sammen med  $\bar{u}$  og  $\bar{s}$  anvendes i en stationær retlinet Gauss model.  $L$  kan ikke blive mindre end 15 km.

I tabellerne 3.2, 3.3 og 3.4 er vist resultatet af beregningerne for Risø fra højderne 123 og 7 m og fra Kastrup i 10 m. Af de 10 års data kunne beregnes henholdsvis 64067, 75009 og 87668 trajektorier, og af disse ramte henholdsvis 7645, 12709 og 16080 København med en fordeling på  $\bar{u}$ ,  $\bar{s}$ ,  $L$  og  $T$  som angivet. Tallene er ordnet efter halvåbne intervaller af  $\bar{u}$  og  $L$  og inden for disse intervaller efter fem stabilitetskategorier, idet A og B samt F og G er slået sammen. Middelvindintervallerne,  $0 < \bar{u} \leq 1$ , ...,  $9 \text{ m/sek} < \bar{u}$  er afsat lodret nedad og trajektorieintervallerne  $15 < L \leq 20$ , ...,  $L > 75 \text{ km}$  er afsat vandret. Relationen  $L = T\bar{u}$  afbildes som en ret linie, hvilket i tabellen ses som trappeliggende bånd. De med cirkel markerede tal angiver rejsetiden  $T$ .

Som eksempel kan vi beregne sandsynligheden

$$P(1 < \bar{u} \leq 2, \bar{s} = FG, 15 < L \leq 25) \times P(\text{puf rammer København})$$

dvs. sandsynligheden for, at et puf rammer København, og at det har bevæget sig med en middelhastighed mellem 1 og 2 m/sek langs

en bane, der er mellem 15 og 25 km lang, og under atmosfæriske forhold, der svarer til stabilitetskategori F eller G. Sandsynligheden bliver:

Risø 123 m:  $(34+29)/64067 \sim 0.001$

Risø 7 m:  $(322+229)/75009 \sim 0.007$

Kastrup 10 m:  $(120+54)/87668 \sim 0.002$

Ovennævnte tal, samt tallene i de tre tabeller i det hele taget, viser, at der er væsentlige forskelle målingerne imellem. En af årsagerne til dette forhold er, at metoderne til stabilitetsbestemmelse ikke er den samme for Risø og Kastrup.

Dette giver som omtalt i afsnit 1.1 anledning til, at kategorierne C og D bestemmes med en relativt større hyppighed for Kastrup.

Målehighden ses også at have en stærk indflydelse, hvilket skyldes, at vindhastigheden over land i gennemsnit i 100 m er 1.5 gange hastigheden i 10 m. Herudover drejer vindretningen med highden, en effekt der i de nederste 100 m af atmosfæren især er udtalt i stabile vejrsituationer [4].

#### REFERENCER

1. Onsite Meteorological Programs. Safety Guide 23 (USAEC, 1972).
2. Turner, D.B., Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. E.P.A. Office of Air Programs Publication. No. AP-26. 1972.
3. Pasquill, F., Atmospheric Diffusion. John Wiley and Sons, New York. 1974. 101-165.
4. Petersen, E.L., On the Kinetic Energy Spectrum of Atmospheric Motions in the Planetary Boundary Layer. Risø Report No. 285. 1975.

#### **Appendiks 4**

#### **FISSIONSPRODUKTINDHOLD I BARSEBACK REAKTOREN**



## BEREGNING AF FISSIONPRODUKTINDHOLD

Fissionsproduktindholdet i en reaktor, som har været i drift en given tid, kan på Risø beregnes med programmerne FIPO (1) og BEGAFIP (2).

FIPO kan tage hensyn til bl.a. kernegeometrien og brændslets sammensætning af fissile nuklider. Neutronenergispektret kan opdeles i et antal termiske-, epitermiske- og hurtige neutronenergi-grupper. På grundlag af et databibliotek, som indeholder fissionsudbytter for de enkelte isotoper, tværsnit og henfaldskonstanter, kan den nuværende version af FIPO beregne kernens indhold af isotoper med en halveringstid, som er større end 10 timer. Indholdet kan beregnes efter en given udbrænding. Programmet er i øjeblikket under udbygning med henblik på at kunne beregne indholdet af isotoper med halveringstider, der er mindre end 10 timer. Den nuværende version beregner aktiviteten for ialt 166 isotoper.

BEGAFIP kan bl.a. tage hensyn til brændslets sammensætning af fissile nuklider. For indlæste værdier af korrektionsfaktoren for det uendelige resonansintegral, som er en funktion af kernegeometrien, neutronfluxforhold (termisk/epitermisk og hurtig/(termisk + epitermisk)), moderatortemperatur, total brændselsmængde i kernen samt udbrændingens tidsfordeling, kan indholdet af ca. 400 isotoper beregnes. BEGAFIP indeholder ligesom FIPO et databibliotek for fissionsudbytter, tværsnit, henfaldskonstanter og branching ratios.

Beregninger af fissionsproduktindhold med FIPO (3) viser, at forsk. len mellem opbygningen af fissionsprodukter i en BWR og en PWR er mindre end 10%. Endvidere er der god overensstemmelse mellem FIPO's resultater og det fissionsproduktinventar, som er anvendt i WASH-1400. En rimelig overensstemmelse fås også for BEGAFIP's resultater, jævnfør tabel 4.1.

I beregningerne i denne rapport er FIPO's resultater anvendt for isotoper med halveringstider, som er større end 10 timer. BEGAFIP's resultater er anvendt for isotoper med halveringstider, som er mindre end 10 timer. For transuranernes vedkommende er anvendt de værdier, som er angivet i WASH 1400 (4). Af hensyn til de forskellige reaktoreffekter er transuranernes aktivitet reduceret med effektforholdet 1700/3200. Tabel 4.2. viser det anvendte indhold af fissionsprodukter og transuraner i en 1700 MWt BWR.

Tabel 4.1. Fissionsproduktindhold i 3200 MWt BWR

	Aktivitet (MCI)		
	WASH 140J 18 MWd/kg U	FIPO 18 MWd/kg U	BEGAFIF 11 MWd/kg U
Kr 85	5.60 E-01	4.86 E-01	6.30 E-01
Kr 85m	2.40 E+01	-	2.97 E+01
Kr 87	4.70 E+01	-	5.08 E+01
Kr 88	6.80 E+01	-	7.18 E+01
Rb 86	2.60 E-02	-	1.38 E-02
Sr 89	9.40 E+01	9.33 E+01	1.08 E+02
Sr 90	3.70 E+00	3.75 E+00	4.79 E+00
Sr 91	1.10 E+02	-	1.34 E+02
Y 90	3.90 E+00	3.84 E+00	4.82 E+00
Y 91	1.20 E+02	1.18 E+02	1.37 E+02
Zr 95	1.50 E+02	1.48 E+02	1.61 E+02
Zr 97	1.50 E+02	-	1.51 E+02
Nb 95	1.50 E+02	1.48 E+02	1.63 E+02
Mo 99	1.60 E+02	1.56 E+02	1.65 E+02
Tc 99m	1.40 E+02	-	1.45 E+02
Ru 103	1.10 E+02	1.17 E+02	1.02 E+02
Ru 105	7.20 E+01	-	5.65 E+01
Ru 106	2.50 E+01	2.16 E+01	2.58 E+01
Rh 105	4.90 E+01	6.19 E+01	5.28 E+01
Te 127	5.90 E+00	-	5.44 E+00
Te 127m	1.10 E+00	5.97 E-01	8.49 E-01
Te 129	3.10 E+01	-	2.91 E+01
Te 129m	5.30 E+00	4.24 E+00	4.79 E+00
Te 131m	1.30 E+01	1.16 E+01	1.15 E+01
Te 132	1.20 E+02	1.13 E+02	1.25 E+02
Sb 127	6.10 E+00	3.16 E+00	5.65 E+00
Sb 129	3.30 E+01	-	3.06 E+01
I 131	8.50 E+01	8.73 E+01	8.37 E+01
I 132	1.20 E+02	-	1.21 E+02
I 133	1.70 E+02	1.71 E+02	1.73 E+02
I 134	1.90 E+02	-	2.09 E+02
I 135	1.50 E+02	1.62 E+02	1.65 E+02
Xe 133	1.70 E+02	1.68 E+02	1.80 E+02
Xe 135	3.40 E+01	4.32 E+01	6.13 E+01
Cs 134	7.50 E+00	2.97 E+00	1.20 E+00
Cs 136	3.00 E+00	1.15 E+00	1.51 E+00
Cs 137	4.70 E+00	4.54 E+00	5.80 E+00
Ba 140	1.60 E+02	1.53 E+02	1.65 E+02
La 140	1.60 E+02	1.55 E+02	1.67 E+02
Ce 141	1.50 E+02	1.43 E+02	1.61 E+02
Ce 143	1.30 E+02	1.36 E+02	1.49 E+02
Ce 144	8.50 E+01	8.58 E+01	9.87 E+01
Pr 143	1.30 E+02	1.36 E+02	1.48 E+02
Nd 147	6.00 E+01	5.77 E+01	5.91 E+01
Np 239	1.64 E+03	1.53 E+03	-
Pu 238	5.70 E-02	-	-
Pu 239	2.10 E-02	2.18 E-02	-
Pu 240	2.10 E-02	1.95 E-02	-
Pu 241	3.40 E+00	3.97 E+00	-
Am 241	1.70 E-03	-	-
Cm 242	5.00 E-01	-	-
Cm 244	2.30 E-02	-	-

Tabel 4.2. Fissionsproduktindhold i Barsebäck reaktoren (MCi)

Isotop	T <sub>K</sub> =0	T <sub>K</sub> =2h	T <sub>K</sub> =30h
Co 58	0.78	0.78	0.77
Co 60	0.29	0.29	0.29
Kr 85	0.45	0.45	0.45
Kr 85m +)	16.6	12.3	0.15
Kr 87 +)	29.9	10.0	0
Kr 88 +)	42.2	25.7	0.025
Rb 86	0.014	0.014	0.013
Sr 89	43.9	43.8	43.8
Sr 90	3.53	3.53	3.53
Sr 91 +)	75.3	65.3	8.78
Y 90	3.60	3.60	3.58
Y 91	56.5	56.5	55.7
Zr 95	75.1	75.1	74.1
Zr 97 +)	81.4	75.1	24.0
Nb 95	75.5	75.5	75.5
Mo 99	81.6	79.8	59.5
Tc 99m +)	77.4	77.2	61.9
Ru 103	66.9	66.9	66.9
Ru 105 +)	24.5	18.6	0.24
Ru 106	10.6	10.6	10.6
Rh 105	39.4	37.9	22.1
Te 127 +)	2.53	2.53	2.33
Te 127m	0.38	0.38	0.38
Te 129 +)	14.7	13.2	1.63
Te 129m	2.40	2.39	2.34
Te 131m	6.56	6.27	3.28
Te 132	60.3	59.2	46.0
Sb 127	1.85	1.82	1.47
Sb 129 +)	15.5	11.3	0.12
I 131	46.6	46.4	42.4
I 132 +)	62.9	63.5	51.1
I 133	90.1	84.0	33.0
I 134 +)	111.1	47.7	0
I 135	85.5	69.6	3.83
Xe 133	89.3	89.3	84.1
Xe 135	25.8	32.9	16.3
Cs 134	3.0	3.0	3.0
Cs 136	0.82	0.82	0.77
Cs 137	4.52	4.52	4.52
Ba 140	79.3	78.9	74.1
La 140	80.5	80.5	78.8
Ce 141	74.0	74.0	72.1
Ce 143	69.6	66.7	37.0
Ce 144	57.1	57.1	57.0
Pr 143	69.4	69.4	68.3
Nd 147	30.3	30.2	28.0
Np 239	901.2	883.8	624.8
Pu 238 ++)	0.03	0.03	0.03
Pu 239 ++)	0.01	0.01	0.01
Pu 240 ++)	0.01	0.01	0.01
Pu 241 ++)	1.80	1.80	1.80
Am 241 ++)	0.001	0.001	0.001
Cm 242 ++)	0.27	0.27	0.27
Cm 244 ++)	0.012	0.012	0.012

+) BEGAFIP

++) WASH 1400

REFERENCER

1. Leif Mortensen, The Fission Product Treatment in the CEB Unit Cell Burn-up Programme. Risø-M-1356.
2. J. Elkert et al., BEGAFIP, et program for beräkning af klyvningsprodukternes aktivitet, beta- och gammaeffekter. RF-72 374 (Studsvik).
3. F. Højerup, Fission Product Inventory in LWR's. RP-4-76. Reaktorteknikafdelingen Risø.
4. Reactor Safety Study. Calculation of Reactor Accident Consequences. Appendix VI. WASH-1400.